



**Ricardo Manuel de Matos Soares de Paulo**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Caracterização e avaliação do  
comportamento ao desgaste de aços  
laminados para parafuso sem fim**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro  
Cardoso Martins Morgado, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado  
Arguente: Prof. Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões  
Vogal: Prof. Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2017**



**Caracterização e avaliação do comportamento ao desgaste de aços laminados para  
parafuso sem fim**

**Copyright © 2017 Ricardo Manuel de Matos Soares de Paulo**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





**Ao meu pai**



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha orientadora Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado, pela oportunidade de realização deste estudo, pelo apoio e acompanhamento ao longo de todo o trabalho.

Gostaria de agradecer também ao Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira pela ajuda na utilização do equipamento de desgaste e conhecimento partilhado sobre o tema, e ainda pela disponibilização do programa Labview e ajuda nas modificações quando necessárias.

À Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado por ter disponibilizado o rugosímetro e ajudado na sua utilização e por todo o acompanhamento ao longo do período de realização da tese.

Ao Professor Doutor Alexandre José da Costa Velhinho pelo conhecimento partilhado sobre a microestrutura dos aços e pelo tempo disponibilizado para a utilização do microscópio do CENIMAT.

Aos técnicos dos laboratórios de Caracterização de Materiais, de Processamento Térmico de Materiais e de Processamento Mecânico de Materiais, Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães por toda a ajuda nas mais variadas tarefas e contratempos da parte prática da tese.

Ao meu colega Miguel Mousinho do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica por ter acompanhado de perto a realização desta tese, pela partilha de conhecimento sobre o tema e por toda a ajuda disponibilizada ao longo destes meses.

A todos os colegas que ajudaram a resolver pequenos detalhes essenciais para a conclusão deste trabalho, pelo empenho, disponibilidade e amizade que demonstraram ao longo destes meses, destacando os meus colegas do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Luís Patrício pela ajuda disponibilizada na sub-rotina em Matlab e Catarina Valente pela ajuda disponibilizada no polimento das amostras. E a todos os meus restantes amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico e que durante o mesmo sempre acreditaram e me deram motivação para realizar este sonho.

À minha namorada por me ter dado toda a motivação ao longo destes últimos anos e em especial nos momentos mais difíceis da realização da tese, sem nunca deixar de acreditar.

Finalmente, gostaria de agradecer o apoio incondicional e fundamental da minha família, em particular à minha mãe e ao meu pai que, cada um à sua maneira, tornaram possível a realização do curso e em particular da tese, demonstrando sempre um grande orgulho e fonte incondicional de motivação nos melhores momentos, mas principalmente nos piores. As palavras não são suficientes para expressar o meu profundo agradecimento.



# Resumo

No âmbito desta tese foi estudado um Parafuso Sem Fim, aplicado na indústria de tratamento de resíduos sólidos com a função de movimentar lixo orgânico, estando por isso, o componente sujeito a ambiente corrosivo. A seleção do material deste tipo de componente, deve ter em consideração as solicitações de serviço e o ambiente onde se aplica, uma vez que ambientes corrosivos tendem a acelerar o processo de desgaste, influenciando a durabilidade/vida útil de serviço deste. O estudo do desgaste revelou-se de uma grande importância para a indústria na medida que, ao ser apontado como a principal causa de substituição ou reparação de equipamentos, levando a elevadas despesas para a produção.

Neste estudo, avaliou-se o comportamento ao desgaste de três aços laminados a quente: um aço idêntico ao caso de estudo que motivou este tema de tese, designado por aço AISI 1024; o aço AISI P20 por ser de baixa liga e o AISI 304 por ser um aço inoxidável. Foram selecionados estes três materiais tendo em conta o processo de fabrico, por construção soldada, do Parafuso Sem Fim. Realizaram-se estudos de comportamento ao desgaste destes três aços laminados a quente sob ação de três ambientes diferentes designados por lixo, dois dos quais orgânicos, com composições diferentes, e um outro orgânico com adição de vidro.

Com este estudo concluiu-se que a presença de partículas de vidro no lixo orgânico promove o aumento do desgaste dos aços. O facto do aço AISI P20 ter o dobro da dureza do AISI 1024 não mostrou grande melhoria em termos de desgaste sob ação dos lixos. Em termos ideais, ou seja, para lixos apenas orgânicos, o aço AISI 304 seria o mais indicado. No entanto, sob ação do lixo orgânico em simultâneo com as partículas de vidro, este aço foi o que apresentou maior desgaste.

**Palavras chave:** AISI 1024, AISI P20, AISI 304, aços laminados a quente, desgaste, parafuso sem fim.



# Abstract

Within the scope of this thesis, a screw from the solid waste treatment industry which had the function of moving the organic waste and therefore subjected to corrosive environment, was studied. The environment and working conditions where the componente is applied must be taken into account for material selection once that corrosive media tend to speed up the wear process, influencing the equipment life/durability. The study of wear has proved to be of great importance to the industry, in such a way that it is pointed out as the main cause for repair and replacement of equipment, leading to high expenses for the industry.

In this study, the wear behaviour of three hot rolled steels was evaluated: one steel identical to the one from the study case that motivated this thesis, designated by AISI 1024, AISI P20 steel as a low alloy steel and AISI 304 stainless steel. Welded construction, as manufacturing process of the screw was taken into account when selecting those three steels. The wear behaviour of this three hot rolled steels was studied under the influence of three different environments designated by waste, two of them were organic, with different compositions, and another one organic with addition of glass.

With this study was possible to conclude that the presence of glass particles in organic waste promotes a significant increase of steel wear. Despite the fact that the AISI P20 steel has twice the hardness of AISI 1024, presented lower wear resistance under the influence of waste. Ideally, that is, only for organic waste, the AISI 304 steel would be the best solution. However, this steel wear the most under the influence of organic waste with addition of glass particles.

**Key-words:** AISI 1024, AISI P20, AISI 304, hot rolled steel, wear, screw.





# Índice

Dedicatória .....	v
Agradecimentos .....	vii
Resumo.....	ix
Abstract .....	xi
Índice de figuras .....	xv
Índice de tabelas .....	xxi
Abreviaturas .....	xxiii
Simbologia.....	xxiii
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Estrutura.....	2
2 Revisão bibliográfica .....	3
2.1 Parafuso sem fim.....	3
2.2 Fenómenos de desgaste.....	4
2.2.1 Desgaste adesivo.....	5
2.2.2 Desgaste abrasivo.....	6
2.2.3 Desgaste corrosivo .....	8
2.3 Métodos de análise de desgaste.....	8
2.3.1 Teste pin-on-disk .....	9
3 Procedimento experimental .....	12
3.1 Melhoramento do equipamento de ensaio de desgaste .....	12
3.2 Suporte da amostra para ensaio imerso .....	13
3.3 Seleção de materiais .....	15
3.4 Ensaio de dureza .....	16
3.4.1 Preparação de amostras.....	18
3.5 Contraste e microestrutura.....	23
3.6 Metodologia de análise de defeitos.....	25
3.7 Ensaio de desgaste .....	27
3.7.1 Preparação de amostras.....	32
3.7.2 Preparação do ensaio.....	35
4 Resultados e discussão.....	42
4.1 Ensaio de dureza.....	42
4.2 Análise quantitativa de defeitos .....	45

4.3	Ensaio de desgaste .....	49
5	Conclusões e trabalho futuro .....	57
	Bibliografia .....	58
	Anexos .....	60
A.	Programa de LabView de determinação da força e coeficiente de atrito .....	61
B.	Gráficos de probabilidade .....	63
C.	Tabelas dos dados referentes às durezas .....	72
D.	Sub-rotina Matlab .....	77
E.	Resultados dos ensaios de desgaste .....	79

# Índice de figuras

Figura 2.1 – Perfil do parafuso de Arquimedes de três hélices [3].	3
Figura 2.2 – Representação simplificada do parafuso sem fim de diâmetro variável [4].	3
Figura 2.3 – Ligação soldada [8].	5
Figura 2.4 – Ligação adesiva [8].	5
Figura 2.5 – Micrografia, através de SEM, da adesão de material à superfície de um aço endurecido [10].	6
Figura 2.6 – Transferência de material da zona de baixa resistência do material duro para o material macio [8].	6
Figura 2.7 – Representação simplificada da abrasão: (a) a dois corpos e (b) a três corpos.[1]....	7
Figura 2.8 – Micrografia de varrimento da interação entre minerais abrasivos e superfícies metálicas: (a) microploughing; (b) microcutting e (c) microcracking [1].	7
Figura 2.9 – Representação simplificada das diferentes configurações de teste de desgaste: (a) ball-on-disk, (b) block-on-ring; (c) twin-ring e (d) ring-on-ring [12].	9
Figura 2.10 – Máquina de ensaios de desgaste com medição do atrito do tipo pin-on-disk [8].	10
Figura 2.11 – Representação do pino e do disco e respectivos parâmetros [15].	10
Figura 2.12 – Perda de material em função da distância de deslizamento [10].	11
Figura 3.1 – Caixa de controlo de atmosfera: (a) com fugas e (b) vedada com silicone.	12
Figura 3.2 – Acesso ao interior da caixa através de: (a) porta deslizante e (b) porta com dobradiças.	13
Figura 3.3 – Base de fixação da amostra do equipamento de desgaste pino em disco.	13
Figura 3.4 – Suporte da amostra para ensaio imerso: (a) modelação em SolidWorks e (b) impressão 3D.	14
Figura 3.5 – Espaçador: (a) modelação em SolidWorks e (b) impressão 3D.	14
Figura 3.6 – Impressora 3D do laboratório de Ensaios Não Destrutivos do DEMI-FCT/UNL.	15
Figura 3.7 – Durómetro HM-112 da Mitutoyo do DEMI.	16
Figura 3.8 – Padrão de calibração 700HV0.3.	17
Figura 3.9 – Indentador para teste de durezas Vickers [13].	18
Figura 3.10 – Espaçamento mínimo entre indentações [13].	18
Figura 3.11 – Chapas de aço: (a) ST52, (b) 2738 e (c) R304 com a identificação dos diferentes planos e direção de laminação indicada a vermelho.	19
Figura 3.12 – Representação simplificada em SolidWorks da codificação de amostras para ensaio de dureza.	19
Figura 3.13 – Serra de corte automático com lubrificação do laboratório Processamento Térmico de Materiais do DEMI-FCT-UNL.	20
Figura 3.14 – Suportes para amostras com resina epóxi.	20
Figura 3.15 – Material utilizado na preparação da resina: (a) resina epóxi; (b) endurecedor; (c) medida para epóxi e (d) medida para endurecedor.	21
Figura 3.16 – Materiais do laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL utilizado no polimento das amostras: (a) polidora Phoenix Alpha e (b) lixas da 80 à 2500.	21
Figura 3.17 – Materiais utilizado no polimento das amostras: (a) panos e pastas diamantadas de 3 µm e 1 µm e (b) lubrificante.	22
Figura 3.18 – Microscópio utilizado para verificação da superfície das amostras: (a) microscópio Olympus CX41; (b) controlador de luminosidade e (c) controlados da câmara fotográfica DP21.	22
Figura 3.19 – Representação da microestrutura da chapa de aço ST52 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respetivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d).	23

Figura 3.20 – Representação da microestrutura da chapa de aço 2738 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respectivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d). ....	24
Figura 3.21 – Representação da microestrutura da chapa de aço R304 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respectivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d). ....	25
Figura 3.22 – Microscópio ótico invertido Leica DMI5000 M CENIMAT. ....	26
Figura 3.23 – Direção de fotografias no microscópio para análise quantitativa de defeitos. ....	26
Figura 3.24 – Fotografia multistep da amostra ST52-F-C, com identificação da fotografia S004. ....	26
Figura 3.25 – Fotografia S004 da amostra ST52-F-C: (a) antes da aplicação da ferramenta Threshold e (b) com aplicação da ferramenta Threshold. ....	27
Figura 3.26 – Fotografias S014 da amostra R304-P-C: (a) antes da aplicação da ferramenta Threshold e (b) com aplicação da ferramenta Threshold. ....	27
Figura 3.27 – Equipamento utilizado no ensaio de desgaste pin-on-disk. ....	28
Figura 3.28 – Metodologia de calibração do equipamento de desgaste: (a) fixação do fio ao suporte do pino e (b) pormenor da roldana para que o peso seja aplicado na vertical. ....	28
Figura 3.29 – Pesos utilizados no processo de calibração do equipamento e respetiva massa indicada em gramas [g]. ....	29
Figura 3.30 – Gráfico de calibração da célula de carga obtido do programa do Labview. ....	30
Figura 3.31 – Gráfico de calibração da célula de carga com linha de tendência e respetiva equação. ....	30
Figura 3.32 – Equipamentos utilizados para a calibração do termopar: (a) fervedor; (b) prato de indução; (c) termómetro e (d) suporte universal. ....	31
Figura 3.33 – Gráfico de calibração do termopar com linha de tendência e respetiva equação. ....	31
Figura 3.34 – Amostras retificadas do aço ST52 para o ensaio de desgaste e respetiva identificação. ....	32
Figura 3.35 – Retificadora Sunlike SSG-2550AH (a) e pormenor da mesa de fixação e processo de retificação (b). ....	32
Figura 3.36 – Equipamento e metodologia utilizada para obtenção dos valores do acabamento superficial: (a) rugosímetro MAHRSURF; (b) pormenor da medição da rugosidade e (c) representação das três direções de medição do Ra. ....	33
Figura 3.37 – Prensa de aperto (a) e calços (b) utilizados para fixar as amostras do aço R304. ....	34
Figura 3.38 – Lixo-1: (a) limão e (b) mistura utilizada no ensaio. ....	36
Figura 3.39 – Lixo-2: (a) da esquerda para a direita, limão e vidro e (b) mistura utilizada no ensaio. ....	36
Figura 3.40 – Lixo 3: (a) da esquerda para a direita, limão, casca de ovo e casca de batata e (b) mistura utilizada no ensaio. ....	36
Figura 3.41 – Pino utilizado no ensaio de desgaste: (a) antes de ser arredondado e (b) após. ....	37
Figura 3.42 – Colocação do pino no engenho de furar (a) e verificação do pino no microscópio (b). ....	37
Figura 3.43 – Balança de precisão AND GR 200 presente no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT/UNL. ....	38
Figura 3.44 – Material utilizado na medição da temperatura: (a) abertura do rasgo no pino; (b) termopar tipo K e (c) massa térmica e fita Kapton. ....	38
Figura 3.45 – Pesagem antes da realização do ensaio: (a) amostra; (b) conjunto sem o lixo e (c) conjunto com o respetivo lixo. ....	39
Figura 3.46 – Controlador do motor elétrico. ....	40

Figura 3.47 – Gráfico para definição do parâmetro força normal, que relaciona o volume perdido com a força normal.....	41
Figura 4.1 – Representação simplificada da direção das indentações feitas na amostra 2738-P-C.....	42
Figura 4.2 – Imagem do microscópio Olympus CX41 das indentações realizadas na amostra ST52-P-C. ....	42
Figura 4.3 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-A. ....	43
Figura 4.4 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) ST52-F-C; (b) ST52-P-B e (c) ST52-T-C. ....	47
Figura 4.5 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) 2738-F-C; (b) 2738-P-B e (c) 2738-T-C. ....	47
Figura 4.6 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) R304-F-C; (b) R304-P-B e (c) R304-T-C. ....	48
Figura 4.7 – Gráfico da força de atrito em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1. ....	50
Figura 4.8 – Gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1. ....	50
Figura 4.9 – Gráfico da temperatura no pino em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1. ....	50
Figura 4.10 – Amostra após a realização do ensaio ST52-C Lixo-1: amostra (a); Micrografias da pista de desgaste (b) e da ponta do pino (c). ....	51
Figura A.1 – Painel frontal do programa do Labview para determinação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino. ....	61
Figura A.2 – Diagrama de blocos do programa do Labview para determinação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino. ....	62
Figura B.1 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-B. ....	63
Figura B.2 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-C. ....	63
Figura B.3 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-A.....	64
Figura B.4 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-B.....	64
Figura B.5 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-C.....	64
Figura B.6 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-A.....	65
Figura B.7 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-B.....	65
Figura B.8 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-C.....	65
Figura B.9 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-A.....	66
Figura B.10 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-B.....	66
Figura B.11 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-C.....	66
Figura B.12 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-A.....	67
Figura B.13 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-B.....	67
Figura B.14 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-C.....	67
Figura B.15 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-A.....	68
Figura B.16 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-B.....	68
Figura B.17 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-C.....	68
Figura B.18 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-A.....	69
Figura B.19 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-B.....	69
Figura B.20 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-C.....	69
Figura B.21 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-A. ....	70
Figura B.22 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-B. ....	70
Figura B.23 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-C.....	70
Figura B.24 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-A. ....	71

Figura B.25 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-B.....	71
Figura B.26 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-C.....	71
Figura E.1 – Resultados do ensaio ST52-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	79
Figura E.2 – Resultados do ensaio ST52-R Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	80
Figura E.3 – Resultados do ensaio 2738-A Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	81
Figura E.4 – Resultados do ensaio 2738-C Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	82
Figura E.5 – Resultados do ensaio 2738-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	83
Figura E.6 – Resultados do ensaio R304-B Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	84
Figura E.7 – Resultados do ensaio R304-C Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	85
Figura E.8 – Resultados do ensaio R304-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	86
Figura E.9 – Resultados do ensaio ST52-H Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	87
Figura E.10 – Resultados do ensaio ST52-F Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	88
Figura E.11 – Resultados do ensaio ST52-A Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	89
Figura E.12 – Resultados do ensaio 2738-B Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no	



pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	102
Figura E.25 – Resultados do ensaio R304-K Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	103
Figura E.26 – Resultados do ensaio R304-F Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.....	104



# Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Composição química dos aços selecionados para o presente estudo.....	16
Tabela 3.2 - Pesos utilizados no processo de calibração do equipamento de desgaste.....	29
Tabela 3.3 – Valores de Ra para os diferentes materiais tal como recebidos, segundo as três orientações.....	33
Tabela 3.4 – Valores de Ra obtidos para cada material após retificação. ....	34
Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste. ....	40
Tabela 4.1 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-A. ....	44
Tabela 4.2 – Quadro resumo da média das durezas [HV] por amostra e por material. ....	44
Tabela 4.3 - Contagem de defeitos e respetiva área da fotografia S004 da amostra R304-F-C. ....	46
Tabela 4.4 – Distribuição de áreas em diferentes classes.....	46
Tabela 4.5 – Volume da amostra perdido para cada amostra de cada material e cada lixó.....	55
Tabela C.1 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-B.....	72
Tabela C.2 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-C.....	72
Tabela C.3 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-A. ....	72
Tabela C.4 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-B. ....	72
Tabela C.5 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-C. ....	73
Tabela C.6 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-A. ....	73
Tabela C.7 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-B. ....	73
Tabela C.8 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-C. ....	73
Tabela C.9 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-A. ....	73
Tabela C.10 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-B. ....	73
Tabela C.11 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-C. ....	74
Tabela C.12 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-A. ....	74
Tabela C.13 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-B. ....	74
Tabela C.14 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-C. ....	74
Tabela C.15 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-A. ....	74
Tabela C.16 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-B. ....	74
Tabela C.17 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-C. ....	75
Tabela C.18 – Indentações e durezas da amostra R304-F-A. ....	75
Tabela C.19 – Indentações e durezas da amostra R304-F-B. ....	75
Tabela C.20 – Indentações e durezas da amostra R304-F-C. ....	75
Tabela C.21 – Indentações e durezas da amostra R304-P-A.....	75
Tabela C.22 – Indentações e durezas da amostra R304-P-B.....	75
Tabela C.23 – Indentações e durezas da amostra R304-P-C.....	76
Tabela C.24 – Indentações e durezas da amostra R304-T-A.....	76
Tabela C.25 – Indentações e durezas da amostra R304-T-B.....	76
Tabela C.26 – Indentações e durezas da amostra R304-T-C.....	76



# Abreviaturas

3D	Três Dimensões
AD	Anderson-Darling
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
UNL	Universidade Nova de Lisboa
HV	Dureza Vickers
CENIMAT	Centro de Investigação de Materiais
T	Topo
P	Perfil
F	Frente

# Simbologia

$p$	Força aplicada [N]
$d$	Média das diagonais da indentação [ $\mu\text{m}$ ]
$d1$	Diagonal vertical da indentação [ $\mu\text{m}$ ]
$d2$	Diagonal horizontal da indentação [ $\mu\text{m}$ ]
$dV$	Maior diagonal da indentação [ $\mu\text{m}$ ]
$f$	Força de calibração
$\text{valor-}p$	Valor de probabilidade
$N$	Número de observação
$Ra$	Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]
$Vp$	Velocidade linear na pista [m/s]
$\omega_a$	Velocidade de rotação da amostra [rpm]
$r$	Raio da pista de desgaste [m]
$\omega_m$	Velocidade de rotação do motor [rpm]
$D$	Distância de deslizamento [m]
$t$	Duração do ensaio [s]
$\alpha$	Valor de confiança



# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Na década de 60 verificou-se um acentuado aumento de falhas devido ao desgaste dos equipamentos. Mais ainda, estudos da altura provaram que uma percentagem do Produto Interno Bruto estava relacionada com a tribologia, termo que foi introduzido como sendo a ciência que estuda o atrito e fenómenos a este associados, como é o caso do desgaste [1], [2].

O parafuso sem fim é um componente mecânico utilizado na indústria com uma grande variedade de aplicações. No âmbito desta tese foi estudado um parafuso sem fim utilizado na indústria de tratamento de resíduos sólidos, tendo este, como função, deslocar os resíduos orgânicos num equipamento. Da interação deste componente mecânico com os resíduos, a indústria em causa verificou um desgaste excessivo quer na hélice quer no veio, levando à sua retirada de serviço com uma frequência fora do esperado. O exposto, levou à motivação desta tese, ou seja, estudo ao desgaste do material existente e seleção de outros materiais alternativos, tendo em conta o processo de fabrico, com o intuito de estudar o comportamento ao desgaste em diferentes resíduos sólidos.

A principal motivação deste estudo levou à aquisição de conhecimentos técnico científicos sobre ensaios laboratoriais, desde a preparação das amostras nos laboratórios de Processamento Térmico de Materiais, Processamento Mecânico de Materiais e Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), nomeadamente com recurso a técnicas de corte, retificação, polimento, análise microscópica, instrumentos de medida como o rugosímetro, durómetro, máquina de ensaio de desgaste *pin-on-disk*, etc. A aquisição de conhecimentos técnico científicos no âmbito da aquisição de dados e posteriormente tratamento dos mesmos, recorrendo a vários softwares como MatLab, LabView, Minitab, SolidWorks, ImageJ, entre outros, foi motivante para o autor, sendo uma mais valia para a vida futura como Engenheiro Mecânico.

## 1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal a caracterização e avaliação do comportamento ao desgaste de três aços laminados a quente, utilizados na produção de um parafuso sem fim a ser aplicado na indústria de tratamento de resíduos sólidos. O ensaio de desgaste foi feito tendo em conta as solicitações de serviço do componente e o desgaste adicional causado pelos produtos químicos provenientes da decomposição/degradação dos resíduos sólidos orgânicos. Foi utilizado um equipamento de ensaio de desgaste do tipo *pin-on-disk*, existente no

Laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT/UNL, sendo o desgaste provocado por um pino na presença de um banho químico que simulou as condições ambientais de serviço do componente mecânico.

Este trabalho, devido à sua dimensão foi subdividido em diferentes partes, com objetivos específicos, ou seja:

- Melhoramento do equipamento de desgaste *Pin-on-Disk* presente no laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT/UNL;
- Caracterização da dureza, dos defeitos de fabrico e do comportamento ao desgaste de três aços laminados a quente;
- Avaliação da influência do banho químico no comportamento ao desgaste do aço;
- Seleção do material que permita melhorar a durabilidade do Parafuso Sem Fim.

### 1.3 Estrutura

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos e cinco anexos.

O **capítulo 1** inclui uma breve introdução de contextualização do estudo, motivação e objetivos.

No **capítulo 2** aborda-se o estado de arte, que engloba a teoria e princípio físico do mecanismo de desgaste e do parafuso sem fim. A informação fornecida neste capítulo permite alcançar uma melhor compreensão do presente estudo e da análise e comparação dos resultados obtidos.

São descritos, no **capítulo 3**, os equipamentos necessários ao estudo do comportamento ao desgaste e à verificação do desgaste. São ainda apresentados os procedimentos experimentais utilizados, identificando os materiais, as metodologias experimentais e as técnicas de caracterização.

Os resultados obtidos no presente estudo bem como a discussão dos mesmos estão apresentados no **capítulo 4**.

Por último, o **capítulo 5** inclui as conclusões obtidas com o presente estudo e ainda sugestões para estudos futuros.

Nos cinco **anexos** pretende-se incluir programa de aquisição de dados (Anexo A), metodologia de tratamento de dados (Anexo B), dados (Anexo C), programa de tratamento de dados (Anexo D) e resultados (Anexo E).

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Parafuso sem fim

O parafuso sem fim é um componente que remonta aquando da invenção da bomba de água em parafuso por parte de Arquimedes (287-212 a.C.) ou Archimedian Screw (Figura 2.1), que possibilitou a elevação do nível a que se encontrava a água. O parafuso sem fim permite converter um movimento de rotação segundo um determinado eixo num movimento de translação ao longo desse mesmo eixo, como se pode ver na figura apresentada a seguir. Sendo o parafuso sem fim um elemento móvel de um conjunto de elementos está sujeito ao desgaste que possa ocorrer nas interfaces de contacto [3].

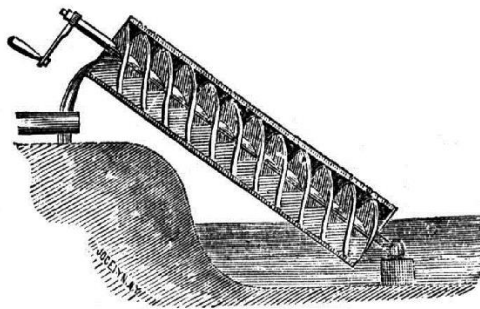


Figura 2.1 – Perfil do parafuso de Arquimedes de três hélices [3].

O parafuso sem fim de Arquimedes tem sofrido algumas modificações, permitindo a sua aplicação em diversas situações tais como redutores mecânicos, compressores, transportadores, extrusoras, entre outros. Cada aplicação requer um parafuso sem fim específico, com uma geometria específica. A título exemplificativo, o parafuso sem fim de um redutor distingue-se do parafuso sem fim de um transportador pelo facto das hélices serem maquinadas a partir de um bruto. Existem ainda parafusos sem fim que são compostos apenas pela hélice.

Tendo em consideração que o presente estudo se debruça sobre o parafuso sem fim aplicado na indústria de tratamento de resíduos sólidos, que tem como função deslocar os resíduos, foi dado ênfase aos parafusos sem fim cujas hélices são soldadas ao veio, idênticos à representação da Figura 2.2.



Figura 2.2 – Representação simplificada do parafuso sem fim de diâmetro variável [4].

O parafuso sem fim é essencialmente composto por dois componentes, o veio e as hélices. Relativamente às hélices, estas são fabricadas a partir de chapa com uma determinada espessura, sendo posteriormente sujeitas ao processo de calandragem. O processo consiste em deformar plasticamente a chapa, conferindo o formato desejado, controlando o ângulo e o passo de cada hélice [4].

Uma aplicação que se pode considerar equiparável ao caso em estudo, é a aplicação do parafuso sem fim na indústria de extração de óleo vegetal a partir de sementes oleaginosas. À medida que o veio roda, as hélices conduzem as sementes ao longo do eixo do parafuso. Como o diâmetro do veio aumenta progressivamente, fricciona as sementes contra as hélices aumentando a pressão, permitindo extrair o óleo das sementes. Este processo implica um desgaste excessivo das hélices, quer pelo atrito entre as sementes e a hélice, quer pela composição química do óleo extraído das sementes. Como demonstrado por Aluko et al. num estudo comparativo das características de desgaste de diferentes materiais de eléctrodos para reparação dos parafusos sem fim, ao comparar o aço macio, o aço revestido, o ferro fundido e o aço inoxidável, concluiu-se que para baixas rotações o eléctrodo de ferro fundido é o mais eficaz, ao passo que para velocidades de rotação superiores, o eléctrodo de aço inoxidável obteve uma maior resistência ao desgaste [5].

Mais recentemente, com o avanço tecnológico em detrimento das energias renováveis, o parafuso sem fim tem sido utilizado para produção de eletricidade. Ao invés de funcionar como bomba de água, aproveita a energia cinética e potencial da água para gerar eletricidade com o auxílio de um gerador acoplado ao veio [6].

## **2.2 Fenómenos de desgaste**

O estudo do desgaste remonta à época do Renascimento, altura em que Leonardo da Vinci (1452-1519) inventou métodos práticos de medir as forças de atrito dos corpos assentes em superfícies planas. Apresentou ainda o coeficiente de atrito como a razão entre a força de atrito e a força normal do corpo. Dois séculos depois, Guillaume Amontons (1663-1705) confirmou que o atrito depende da força normal e é independente da área de contacto aparente [1].

Na década de 1960 verificou-se um aumento de avarias em máquinas maioritariamente devido ao desgaste, ou outras causas a ele associados. Foi então introduzido o conceito de tribologia como sendo a ciência e a tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo. Foram efetuados estudos a nível económico que mostraram perdas de aproximadamente 4,5% do Produto Interno Bruto devido a causas relacionadas com a tribologia, assim, o estudo do desgaste ganhou uma nova dimensão [1], [2].



Considerando o desgaste um fenômeno complexo, não sendo uma propriedade intrínseca do material, trata-se de uma resposta do sistema tribológico, ou tribosistema, tendo como pré-requisito a interação entre superfícies. Da interação de superfícies surge o fenômeno do atrito, torna-se então este o principal fator de desgaste, o que levou à definição atual de desgaste como sendo a perda progressiva de material da superfície de um corpo devido ao movimento relativo na sua superfície [7].

Sendo âmbito desta dissertação o estudo de um parafuso sem fim, que tem como função deslocar e compactar resíduos sólidos, sujeito ao desgaste adesivo, abrasivo e corrosivo, estes fenômenos foram detalhados nos subcapítulos seguintes.

### 2.2.1 Desgaste adesivo

Talvez o método mais comum de desgaste, o desgaste adesivo, ocorre quando um material desliza ou é pressionado sobre outro material, sejam estes idênticos ou não. Quando duas superfícies entram em contacto e depois são separadas, surgem forças de atração que tendem a transferir o material de uma superfície para outra. Quando ocorre separação de material, formam-se fragmentos de desgaste adesivo.

No desgaste adesivo, em contraste com a soldadura, as temperaturas na zona de contacto não são altas o suficiente para que surja o fenômeno de interdifusão atômica e de recristalização (Figura 2.3). Caso a força necessária para provocar a separação pela interface dos dois materiais seja superior à força necessária para separar o mesmo material, dá-se a separação ao longo dos limites de grão desse material, sendo transferida uma partícula de desgaste (Figura 2.4) [8].

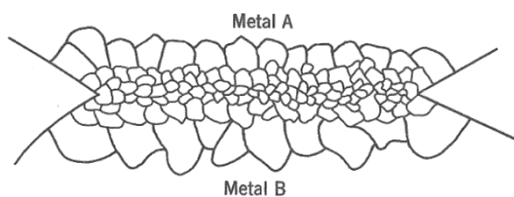


Figura 2.3 – Ligação soldada [8].

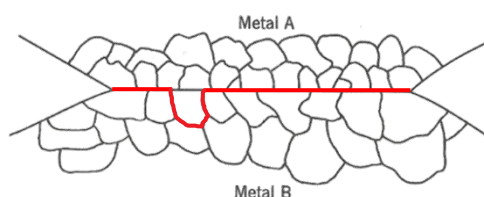


Figura 2.4 – Ligação adesiva [8].

As partículas que se aderem à superfície para a qual são transferidas, pressupõem uma ligação forte entre elas. No entanto, estas partículas tendem a soltar-se, o que por sua vez indica que houve uma alteração na ligação. Este decaimento na força de ligação pode ser explicado de duas formas. Em primeiro lugar, a nível químico, por apresentarem uma área de superfície considerável, as partículas têm tendência a oxidar rapidamente, o que provoca o enfraquecimento da ligação fazendo com que o fragmento se solte. Por outro lado, quando a partícula se separa da superfície original e se adere à superfície para onde foi transferida surgem tensões residuais. Esta energia ao ser superior à energia necessária para provocar a adesão, provoca a separação entre o fragmento e a superfície [9].

Segundo Sarkar, num ensaio com um pino de um material mais macio que o disco, aplicando uma força de 100N, ocorreu transferência de material do aço macio para o aço endurecido, tratando-se de uma característica sugestiva de desgaste adesivo (Figura 2.5) [10].

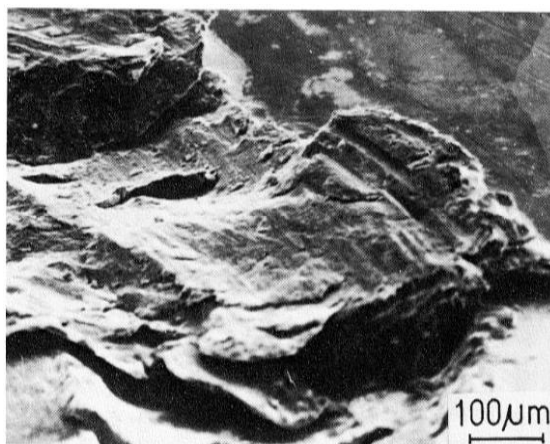


Figura 2.5 – Micrografia, através de SEM, da adesão de material à superfície de um aço endurecido [10].

A formação de partículas devido ao desgaste adesivo, não ocorre apenas em superfícies de grande rugosidade, pode também ocorrer em superfícies com bons acabamentos superficiais. Além disso, a separação dos fragmentos não ocorre apenas das superfícies macias para as superfícies de maior dureza, dado que podem existir zonas de baixa resistência nas superfícies de maior dureza, surgindo a separação de material da superfície mais dura, que por sua vez é transferida para a superfície mais macia (Figura 2.6) [8].

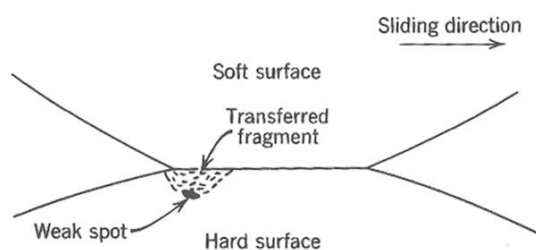


Figura 2.6 – Transferência de material da zona de baixa resistência do material duro para o material macio [8].

### 2.2.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície dura e rugosa desliza sobre uma superfície mais macia, provocando rasgos nesta última superfície, este fenômeno é denominado de desgaste abrasivo a dois corpos. No entanto, existe ainda o caso do desgaste abrasivo a três corpos, o qual se deve à presença de partículas abrasivas entre as duas superfícies em movimento relativo, sendo que estas partículas podem ser partículas adventícias ou detritos que se soltem durante o deslizamento [8], [10].

Na sua essência, os dois modos de desgaste abrasivo podem ser diferenciados pelo facto de haver ou não um terceiro corpo que provoque o desgaste de uma das superfícies, como é possível verificar na Figura 2.7.

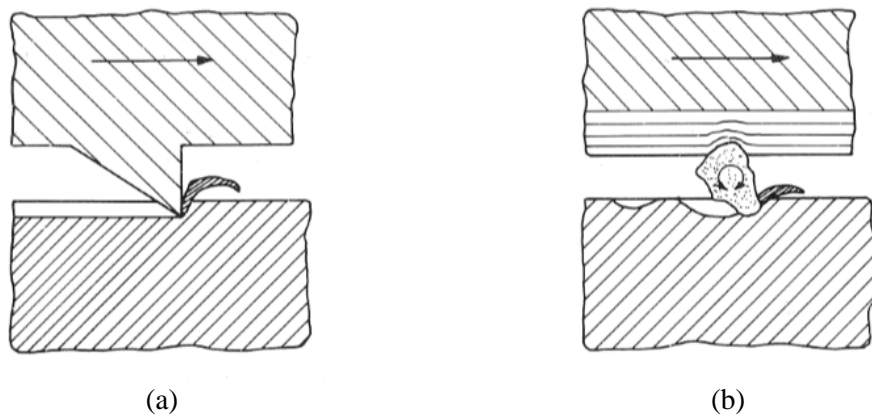


Figura 2.7 – Representação simplificada da abrasão: (a) a dois corpos e (b) a três corpos.[1]

O termo desgaste abrasivo não descreve na totalidade os mecanismos de desgaste presentes neste processo. Na verdade, surgem vários mecanismos com diferentes características. Dos diferentes mecanismos identificados, destacam-se *microploughing*, *microcutting* e *microcracking*, identificados na Figura 2.8 [1].

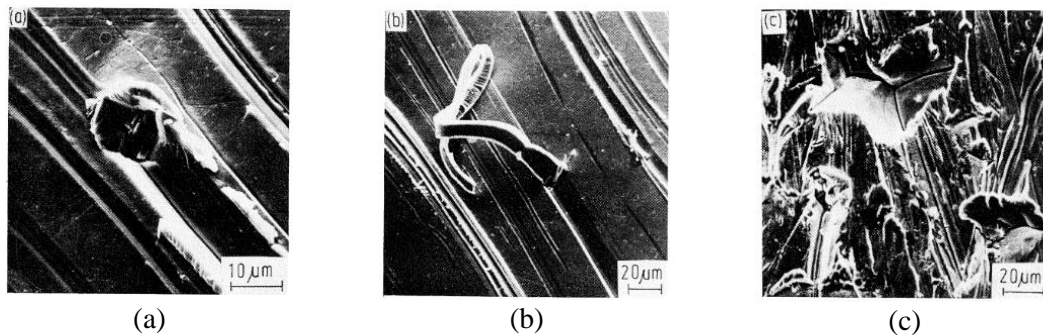


Figura 2.8 – Micrografia de varrimento da interação entre minerais abrasivos e superfícies metálicas: (a) *microploughing*; (b) *microcutting* e (c) *microcracking* [1].

- *Microploughing* – Idealmente, não ocorre remoção do material, ao invés, este é deslocado para os lados do rasgo provocado pela saliência abrasiva;
- *Microcutting* – Durante este mecanismo a perda de material corresponde ao volume do rasgo produzindo durante o processo de desgaste;
- *Microcracking* – Ocorre quando as partículas abrasivas impõem concentrações de tensão que provocam a separação de pequenos fragmentos de material.

### **2.2.3 Desgaste corrosivo**

Relativamente ao desgaste corrosivo, trata-se de um mecanismo que ocorre quando o deslizamento acontece num ambiente corrosivo. Na fase inicial ocorre a corrosão, que acaba por ser removida durante o deslizamento, surgindo assim condições propícias à formação de novas camadas de corrosão. Desta maneira, o desgaste ocorre num espaço de tempo mais curto do que se o deslizamento ocorresse num ambiente controlado [8].

O desgaste corrosivo é um mecanismo bastante complexo, podendo ocorrer de três modos distintos. O primeiro modo apresenta uma resposta idêntica a uma situação em que ocorre corrosão, havendo um ataque corrosivo à superfície do material durante o desgaste. O segundo destaca-se pela formação de produtos de reação quebradiços, que tende a ocorrer apenas a altas temperaturas (mais propícias à reação). O último modo distingue-se pela formação de produtos de reação mais macios que o material base, podendo originar baixas taxas de desgaste [8].

Na maioria dos casos, o desgaste corrosivo apresenta uma taxa de desgaste superior aos restantes mecanismos de desgaste. Como foi demonstrado por Li et al., o ambiente em que se realiza o estudo, tem grande influência na taxa de desgaste do aço H13, uma vez que a taxa de desgaste obtida para condições atmosféricas foi bastante inferior em relação à taxa de desgaste com o aço imerso num banho químico [11].

## **2.3 Métodos de análise de desgaste**

Como já foi referido, o desgaste, tratando-se de um processo de perda progressiva de material, provoca alterações nas superfícies dos materiais, pelo que é possível de ser medido realizando análises antes e depois de ocorrer o fenómeno de desgaste, registando-se as alterações que ocorreram.

O método mais simples de medição do desgaste é através da massa. Este método consiste em realizar uma medição da massa da amostra antes e após a realização do ensaio de desgaste. Desta maneira é possível saber, quantitativamente, o desgaste provocado na amostra, ou seja, é possível saber a massa de material que se separou da amostra. No entanto, este método não é adequado quando se pretende analisar o desgaste ao longo da interface de contacto, uma vez que a medição da massa apenas permite fazer uma análise global da amostra. Este método requer uma balança com uma boa resolução, dado que se perde uma quantidade de material bastante reduzida durante o processo de desgaste [8].

Para efetuar a medição da quantidade de material que se separou da amostra, é preciso primeiro reproduzir o fenómeno do desgaste. Existem atualmente no mercado vários equipamentos capazes de simular as condições de desgaste da indústria, estes equipamentos são denominados tribómetros. Os tribómetros podem ainda apresentar diferentes configurações para a realização dos ensaios de desgaste, nomeadamente, *pin-on-disk*, *ball-on-disk*, *block-on-ring*, *twin-ring* e *ring-on-ring* (Figura 2.9) [12].

O presente estudo foi efetuado num equipamento *pin-on-disk* presente no laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT/UNL, pelo que foi apenas abordado mais pormenorizadamente no subcapítulo seguinte este tipo de equipamentos.

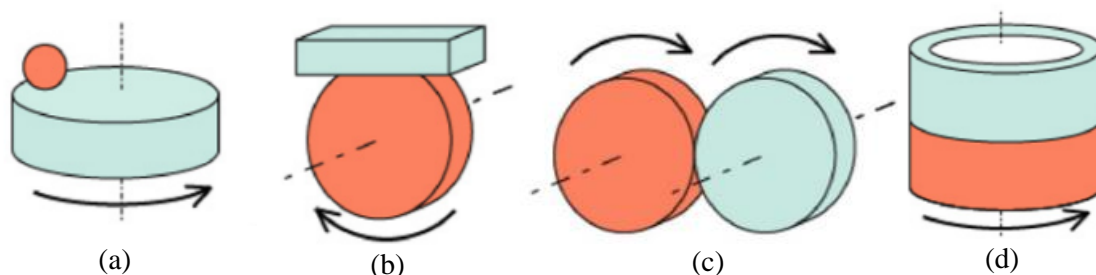


Figura 2.9 – Representação simplificada das diferentes configurações de teste de desgaste: (a) *ball-on-disk*, (b) *block-on-ring*; (c) *twin-ring* e (d) *ring-on-ring* [12].

### 2.3.1 Teste *pin-on-disk*

Com este teste pretende-se reproduzir em laboratório uma situação de desgaste onde se possa quantificar a perda de material que ocorre na amostra, partindo de parâmetros especificados para o efeito, sendo ainda possível determinar o coeficiente de atrito resultante do contacto entre os dois materiais.

O teste *pin-on-disk* foi feito recorrendo a um equipamento do laboratório do DEMI-FCT-UNL idêntico ao equipamento da Figura 2.10, composto por um disco e por um pino. Existem diversas variantes deste tipo de equipamento, podendo variar essencialmente em duas configurações. Nuns casos, o disco roda enquanto que o pino se mantém fixo, noutros casos acontece o oposto, o pino desloca-se enquanto que o disco se mantém fixo. Uma outra configuração que pode variar é o facto de o plano do disco poder ser orientado vertical ou horizontalmente. Relativamente ao método de aplicação da carga necessária sobre o pino, este pode ser feito através de pesos calibrados, ou pode ser regulado hidráulica ou pneumáticamente. Para efeitos de cálculo do coeficiente de atrito resultante da interação das duas superfícies é necessária uma célula de carga que permite extrair os valores da força de atrito durante o ensaio [13].

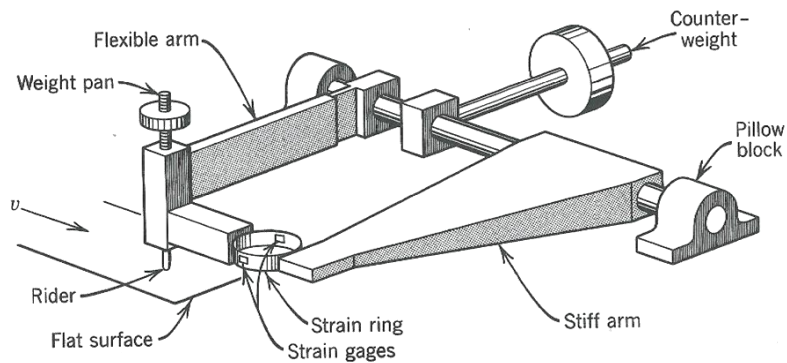


Figura 2.10 – Máquina de ensaios de desgaste com medição do atrito do tipo *pin-on-disk* [8].

O teste *pin-on-disk*, apesar de se considerar um teste de desgaste bastante comum, não permite recriar todas as condições de serviço de um determinado componente. Por este motivo, não é possível garantir que os resultados obtidos permitam determinar a taxa de desgaste do material que efetivamente ocorreria na indústria, especialmente se as condições de serviço forem diferentes das estabelecidas durante o ensaio.

A nível da sua aplicabilidade, o teste pode ser implementado em vários materiais, tendo apenas como requisito a possibilidade de serem preparadas amostras com as dimensões necessárias ao teste e que o material suporte as tensões impostas sem que ocorra rutura ou flexão excessiva. Segundo a norma ASTM G99-00 (*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*), o pino deve apresentar um diâmetro compreendido entre 2 e 10 mm. Relativamente ao disco, este deve ter um diâmetro compreendido entre 30 e 100 mm e uma espessura de 2 a 10 mm. Uma vez que o teste se baseia no deslizamento do pino sobre o disco, a correta preparação da superfície da amostra é bastante importante, pelo que a norma recomendada uma rugosidade inferior ou igual a  $0,8 \mu\text{m}$  [13].

Para a realização do teste é necessário ter em consideração vários parâmetros, uma vez que estes são responsáveis pelo surgimento de alterações dos valores obtidos. Como é possível verificar na Figura 2.11, os parâmetros são então, a carga, a velocidade e a distância percorrida. No entanto, é ainda necessário ter em conta a temperatura e a atmosfera.

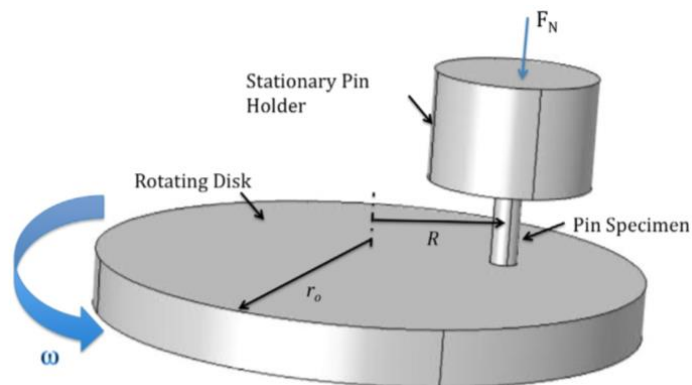


Figura 2.11 – Representação do pino e do disco e respetivos parâmetros [15].

Relativamente ao parâmetro da carga, que corresponde à força aplicada na interface de contacto entre o pino e o disco, foi definido por meios de pesos calibrados. Segundo Sarkar e Bortoleto et al., com o aumento da força aplicada foram verificadas maiores taxas de desgaste, não se tratando de uma variação diretamente proporcional [10], [14].

A perda de material devida ao desgaste surge em dois estágios distintos que dependem da distância de deslizamento: um primeiro estágio curvilíneo e um segundo estágio retilíneo (Figura 2.12). No último estágio torna-se possível determinar a taxa de desgaste a partir da tangente do ângulo formado pela reta com a horizontal [10].

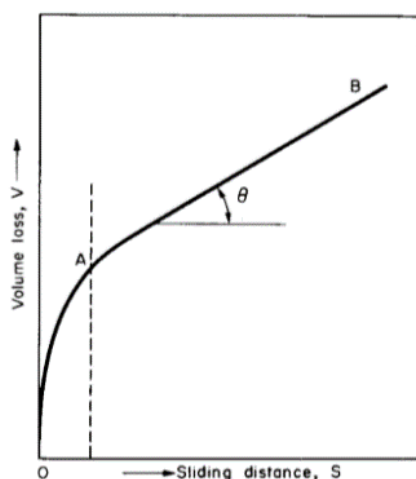


Figura 2.12 – Perda de material em função da distância de deslizamento [10].

A temperatura é também um parâmetro a ter em consideração, uma vez que o aumento de temperatura promove a formação de oxidação, afetando o desgaste quer do disco quer do pino [15].

Durante o ensaio é necessário controlar a atmosfera, uma vez que uma alteração da humidade do ar pode implicar uma alteração do modo de desgaste, passando de um desgaste unicamente adesivo para um desgaste corrosivo. Por sua vez, a corrosão do material promove a criação de pequenas partículas, ocorrendo assim desgaste abrasivo [16].

## 3 Procedimento experimental

### 3.1 Melhoramento do equipamento de ensaio de desgaste

Para obter resultados mais fiáveis nos ensaios de desgaste no laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT/UNL, foi necessário um ambiente de ensaio controlado. Desta forma, foi necessário melhorar este aspeto no equipamento, pelo qual o autor em conjunto com o colega do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Miguel Mousinho, repensaram uma forma de *upgrade* da caixa existente pois apresentava algumas falhas a nível do isolamento (Figura 3.1 (a)).

De modo a obter um melhor isolamento da caixa existente, recorrendo aos materiais disponíveis no laboratório, realizaram-se as seguintes tarefas:

- Vedou-se a zona de contacto do acrílico com a estrutura de metal recorrendo ao silicone (Figura 3.1);
- Modificou-se a porta de acesso, para colocação da amostra e pino, substituindo o sistema de deslizamento por um sistema de porta com dobradiças e fecho de alavanca graduável (Figura 3.2).



Figura 3.1 – Caixa de controlo de atmosfera: (a) com fugas e (b) vedada com silicone.





(a)



(b)

Figura 3.2 – Acesso ao interior da caixa através de: (a) porta deslizante e (b) porta com dobradiças.

## 3.2 Suporte da amostra para ensaio imerso

O suporte de fixação da amostra para o ensaio de desgaste no equipamento referido anteriormente, apenas permitiu a correta fixação de uma amostra de 45 mm por 45 mm (Figura 3.3), caso apropriado para um ensaio de desgaste deslizante a seco. No entanto, no âmbito desta tese, foi necessário imergir a amostra num banho químico, que simulasse as condições a que estava sujeito o parafuso sem fim em serviço, como referido, e para tal o autor criou um novo suporte de fixação da amostra.



Figura 3.3 – Base de fixação da amostra do equipamento de desgaste pino em disco.

O suporte utilizado para o ensaio de desgaste com a amostra imersa num banho químico foi modelado em 3D no SolidWorks (Figura 3.4 (a)) e impresso em 3D no laboratório de Ensaios Não Destrutivos do DEMI-FCT/UNL (Figura 3.4 (b)). O dimensionamento do suporte foi feito tendo em consideração a dimensão da base de fixação da amostra no equipamento de desgaste (Figura 3.3) e a dimensão das amostras (30x30 mm). Na base do suporte encontra-se uma

reentrância com as dimensões da amostra para que esta permaneça solidária à rotação do suporte. A pista de desgaste descreve uma circunferência, que pode ser observada na Figura 3.4 (a).

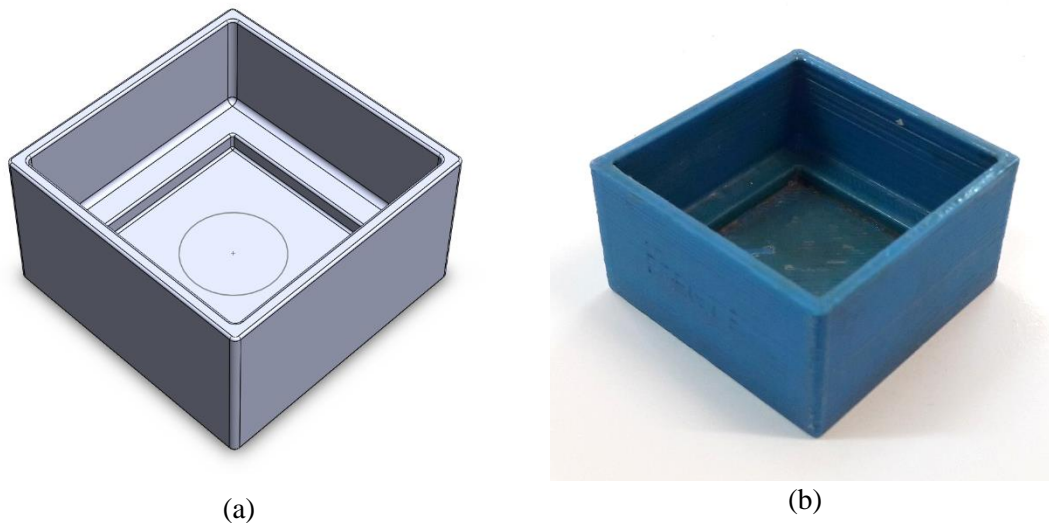


Figura 3.4 – Suporte da amostra para ensaio imerso: (a) modelação em SolidWorks e (b) impressão 3D.

Além do suporte de fixação da amostra, ainda se modelou em 3D no SolidWorks um espaçador (Figura 3.5 (a)). O espaçador tem como função ocupar o espaço entre a face lateral da amostra e a face lateral do suporte, reduzindo assim a quantidade de material necessário para que a amostra se encontre totalmente imersa. No espaçador foram desenhadas duas saliências que têm como função facilitar a extração deste, sendo possível puxar com o auxílio de um alicate ou até mesmo uma pinça. Esta peça também foi fabricada com recurso à impressora 3D do laboratório de Ensaaios Não Destrutivos do DEMI-FCT/UNL (Figura 3.5 (b)).

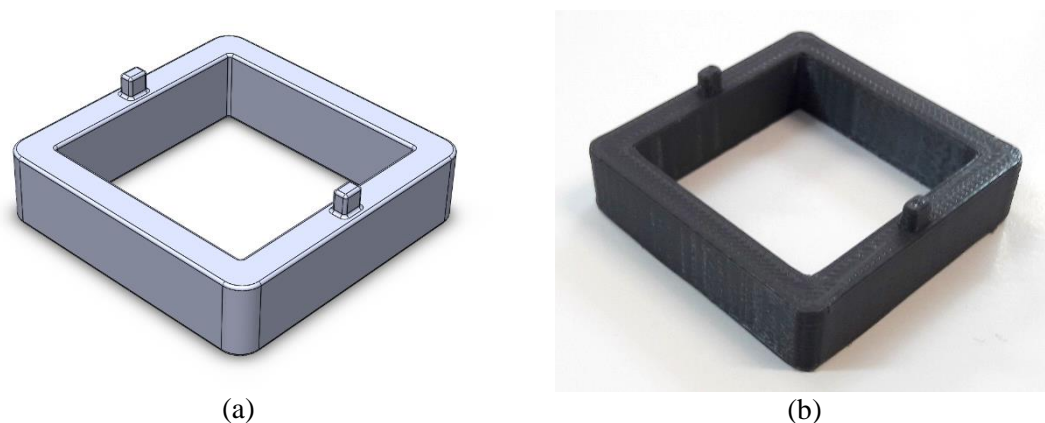


Figura 3.5 – Espaçador: (a) modelação em SolidWorks e (b) impressão 3D.

Na Figura 3.6 é apresentada uma fotografia panorâmica da Impressora 3D do laboratório de Ensaios Não Destrutivos do DEMI-FCT/UNL, utilizada no fabrico dos componentes de suporte das amostras (caixa de suporte para ensaio imerso e espaçador).

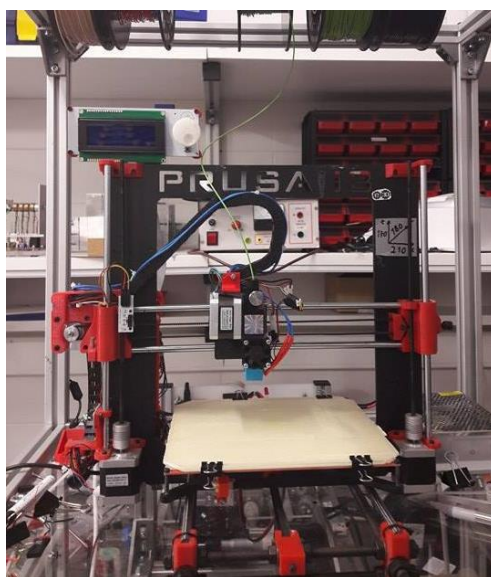


Figura 3.6 – Impressora 3D do laboratório de Ensaios Não Destrutivos do DEMI-FCT/UNL.

### 3.3 Seleção de materiais

O material utilizado na produção do parafuso sem fim foi tido em consideração como um dado importante para a caracterização e avaliação do comportamento ao desgaste do mesmo. Sendo este estudo baseado num caso real, recorreu-se à composição química obtida de um componente retirado de serviço para conhecimento da designação do material (ver Tabela 3.1, aço original). A Tabela 3.1 apresenta também a composição química do aço ST52 (DIN ST52-3 ou AISI 1024) que se trata de um aço de construção não ligado, sendo esta semelhante à do aço original [17]. Este aço ST52, laminado a quente, foi adquirido, no âmbito desta tese, à RAMADA AÇOS SPECIAL STEEL SOLUTIONS, em chapas 160x160x10.

Para a realização do presente estudo, foi ainda necessário seleccionar outros materiais para que fosse possível caracterizá-los quanto ao comportamento ao desgaste e comparar com o ST52, de modo a poder ser apresentada uma solução que aumentasse significativamente o tempo de vida útil do parafuso sem fim.

A presença de determinados elementos químicos na composição do aço, permite melhorar o comportamento dos mesmos, nomeadamente à corrosão e ao desgaste, pelo que foi necessário seleccionar um aço de construção ligado, o aço 2738 (DIN 40 CrMnNiMo 8-6-4 ou AISI P20) [18]. Sabe-se ainda que os aços inoxidáveis são bastante utilizados em componentes que estejam sujeitos a ambientes corrosivos, tendo sido então seleccionado como terceiro material o aço R304

(DIN X 5 CrNiMo 18 10 ou AISI 304) [19]. Na Tabela 3.1 foram apresentados os diferentes materiais selecionados e as suas composições químicas.

Tabela 3.1 – Composição química dos aços selecionados para o presente estudo.

Aços	Elementos [%]										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	N	Cu
<b>Original</b>	0,17	0,31	1,40	0,014	0,014	0,08	0,04	-	0,06	-	0,07
<b>ST52</b>	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	-	-	-	-	0,012	0,55
<b>2738</b>	0,45	0,40	1,60	0,030	0,010	2,10	1,20	0,25	-	-	-
<b>R304</b>	0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	18,50	13,00	-	-	-	-

### 3.4 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL, no equipamento HM-112 da Mitutoyo (Figura 3.7), seguindo a norma ASTM E384-16 (*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*) [20]. A metodologia apresentada na norma foi aplicada para as indentações Vickers, cuja força varia de  $9,8 \times 10^{-3}$  N a 9,8 N, ou seja, de 1 gf a 1000 gf.



Figura 3.7 – Durómetro HM-112 da Mitutoyo do DEMI.

Antes de se utilizar o durómetro para os ensaios de dureza, foi necessário proceder à sua calibração. Numa primeira fase foi necessário calibrar as linhas de medida de diagonais, juntando-se as duas linhas até que não passasse luz e marcou-se o zero. Na fase seguinte, partindo de um padrão (Figura 3.8), uma amostra com uma dureza de 700 HV0.3, realizou-se uma indentação e mediu-se as diagonais, obtendo o valor da dureza correspondente ao padrão. Desta maneira foi possível garantir a calibração do equipamento.



Figura 3.8 – Padrão de calibração 700HV0.3.

Como referido anteriormente, para a realização do ensaio de dureza foi necessário indentar a superfície do material, sendo depois medidas as diagonais com o auxílio do microscópio do durómetro e das linhas de medição do microscópio.

Para obter o valor da dureza Vickers divide-se a força aplicada pela área da indentação. No entanto, este valor foi obtido diretamente do computador cujo *software* efetua os cálculos necessários. Estes valores foram confirmados recorrendo à Equação 1 apresentada pela norma, verificando-se a igualdade dos mesmos.

$$HV = 1854,4 \times \frac{p}{d^2} \quad (1)$$

Onde  $HV$  representa a dureza Vickers,  $p$  [gf] representa a força aplicada durante a indentação e  $d$  [ $\mu\text{m}$ ] representa a média das duas diagonais da indentação.

Na Figura 3.9 encontra-se a representação de um indentador de diamante com uma forma piramidal quadrangular cujo ângulo entre as faces é de  $136^\circ$ . As distâncias  $d1$  [ $\mu\text{m}$ ] e  $d2$  [ $\mu\text{m}$ ] representam as diagonais da indentação.

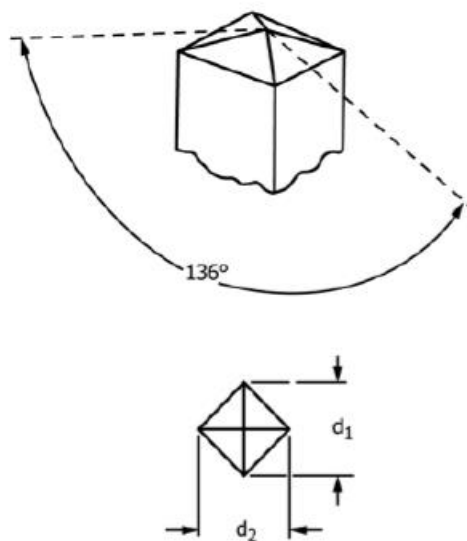


Figura 3.9 – Indentador para teste de durezas Vickers [13].

Os ensaios com forças inferiores a 25 gf podem originar indentações demasiado pequenas (inferiores a 20  $\mu\text{m}$ ), dificultando a correta medição das diagonais, pelo que a escolha da força aplicada deve ser feita de modo a que seja fácil de medir as diagonais [13].

Relativamente ao espaçamento entre indentações, foi necessário garantir que as indentações adjacentes não interferissem umas com as outras, estando a distância mínima entre indentações indicadas na Figura 3.10, onde  $dV$  [ $\mu\text{m}$ ] representa a maior distância da diagonal da indentação.

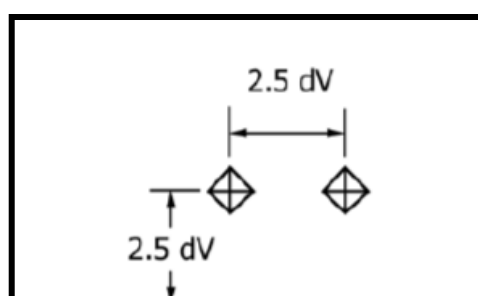


Figura 3.10 – Espaçamento mínimo entre indentações [13].

### 3.4.1 Preparação de amostras

A amostra do material a ser testado deve apresentar uma superfície plana, polida e livre de qualquer sujidade introduzida pelo processo de preparação da amostra, que deve seguir a norma ASTM E3-95 (*Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*) [21].



Relativamente à dimensão das amostras para ensaios de durezas Vickers, esta deve ter entre 12 e 25 mm de lado, no caso de ser quadrada, ou de diâmetro caso seja circular. Relativamente à espessura, a norma não especifica valores, referindo apenas que esta deve ter somente a espessura necessária para o seu manuseamento durante o polimento [20].

A dureza do material foi verificada nos três planos principais, o plano de topo, de perfil e de frente, que correspondem respetivamente aos símbolos T, P e F representados na Figura 3.11. Os três planos foram identificados tendo em conta a direção de laminagem visível à superfície e identificada a vermelho na Figura 3.11.

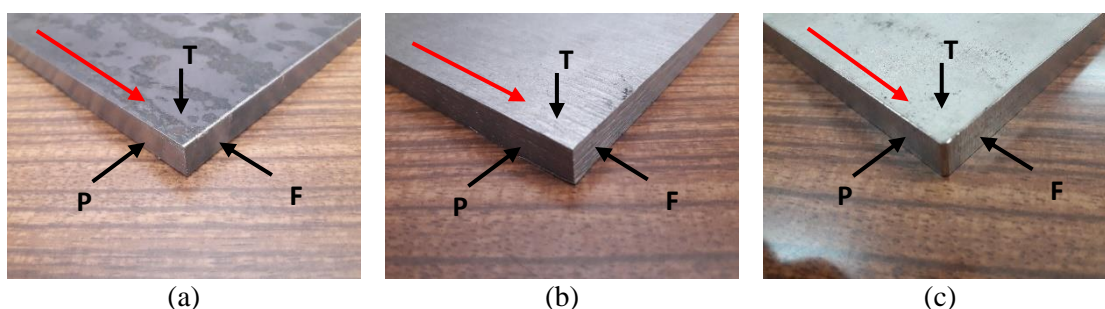


Figura 3.11 – Chapas de aço: (a) ST52, (b) 2738 e (c) R304 com a identificação dos diferentes planos e direção de laminagem indicada a vermelho.

A realização dos ensaios de dureza para as diferentes faces dos diferentes materiais implica a preparação de nove amostras por material. As amostras foram obtidas das chapas de aço adquiridas à RAMADA AÇOS SPECIAL STEEL SOLUTIONS e devidamente identificadas de acordo com a codificação apresentada na Figura 3.12.

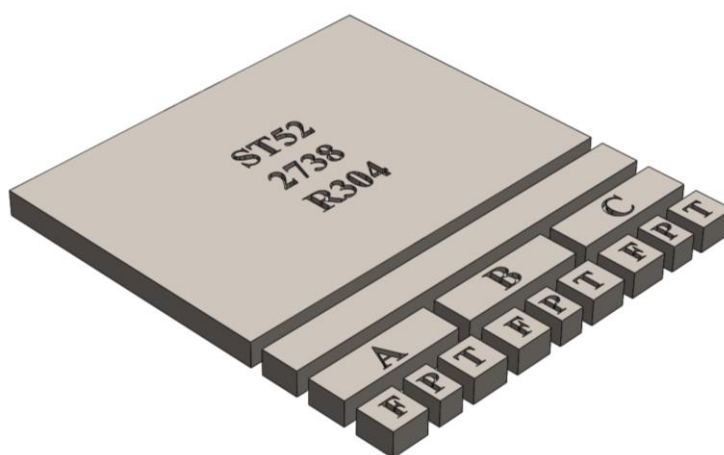


Figura 3.12 – Representação simplificada em SolidWorks da codificação de amostras para ensaio de dureza.

Durante o processo de obtenção das amostras a partir das chapas, foi necessário ter em consideração que o processo de corte pode afetar a microestrutura do material, pelo que foi utilizada uma serra de corte automático com lubrificação (Figura 3.13), do laboratório Processamento Térmico de Materiais do DEMI-FCT/UNL.



Figura 3.13 – Serra de corte automático com lubrificação do laboratório Processamento Térmico de Materiais do DEMI-FCT/UNL.

As amostras apresentavam dimensões relativamente reduzidas, pelo que, para facilitar o processo de polimento, de identificação de microestruturas e de dureza, foi necessário ainda preparar uma resina. Utilizou-se copos específicos como molde (Figura 3.14) e aplicou-se vaselina em toda a área de contacto dos copos, com o intuito de facilitar a remoção das amostras com a resina solidificada.



Figura 3.14 – Suportes para amostras com resina epóxi.

Relativamente à resina, esta foi preparada juntando uma porção de resina epóxi 20-8130-128 com uma porção de endurecedor 20-3432-016 (Figura 3.15). Para cada amostra utilizou-se uma relação de 1:1 (resina e endurecedor). No entanto, para evitar que a mistura reagisse, só se misturou no máximo três porções de resina. Tendo a resina pronta, verteu-se para os copos com as amostras previamente colocadas com a face a polir virada para baixo. O período de solidificação da resina foi de 12 horas. Todo este procedimento foi realizado no laboratório Processamento Térmico de Materiais do DEMI-FCT/UNL.





Figura 3.15 – Material utilizado na preparação da resina: (a) resina epóxi; (b) endurecedor; (c) medida para epóxi e (d) medida para endurecedor.

Em relação ao processo de polimento das amostras, este foi realizado no equipamento Phoenix Alpha (Figura 3.16 (a)) seguindo uma determinada ordem de granulometria das lixas, nomeadamente, 80, 240, 320, 400, 600, 1200, 2500 (Figura 3.16 (b)). Durante o processo de polimento com as lixas, utilizou-se água. No entanto, quando se passou para a fase do polimento final, com os panos e pastas diamantadas (Figura 3.17 (a)) utilizou-se o lubrificante MetaDi Fluid Dialub SW 155003 (Figura 3.17 (b)) obtendo-se um acabamento espelhado. Este processo foi realizado no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL.



(a)



(b)

Figura 3.16 – Materiais do laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL utilizado no polimento das amostras: (a) polidora Phoenix Alpha e (b) lixas da 80 à 2500.



(a)



(b)

Figura 3.17 – Materiais utilizado no polimento das amostras: (a) panos e pastas diamantadas de 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  e (b) lubrificante.

As amostras foram polidas até se obter um acabamento espelhado. No entanto, o que a olho nu pode parecer espelhado, após observação no microscópio pode apresentar riscos que dificultem a visualização das diagonais da indentação e estes podem eventualmente influenciar os resultados relativos à dureza do material. Por estes motivos, após o polimento, verificou-se o estado da superfície das amostras no microscópio Olympus CX41 presente no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL (Figura 3.18).

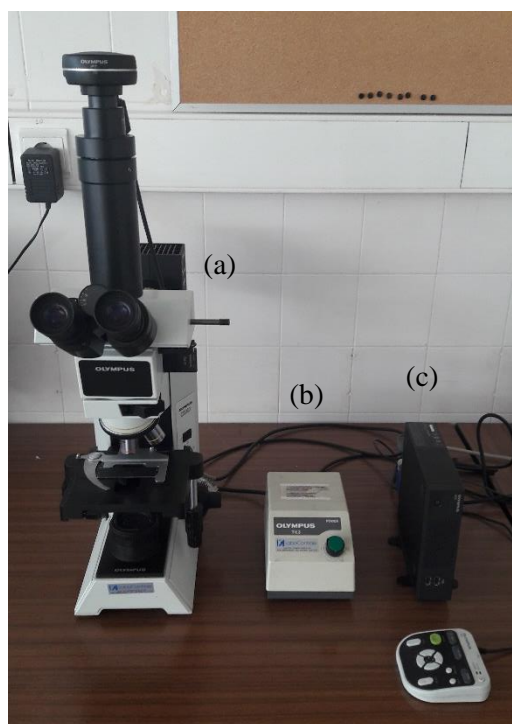


Figura 3.18 – Microscópio utilizado para verificação da superfície das amostras: (a) microscópio Olympus CX41; (b) controlador de luminosidade e (c) controlados da câmara fotográfica DP21.

### 3.5 Contraste e microestrutura

Nesta fase, com as amostras a apresentarem uma superfície espelhada e não sendo possível identificar a microestrutura do material, foi necessário proceder ao contraste destas, evidenciando orientações preferenciais e limites de grãos. Para o contraste, seguiu-se a norma ASTM E407-07 (*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*) [22], donde se seleccionou o reagente apropriado ao material. Esta seleção foi feita com base na composição química dos aços.

O aço ST52, tratando-se de um aço de construção não ligado, com um baixo teor em carbono, principalmente utilizado em construções soldadas, foi contrastado com Nital (solução a 2%), de modo a revelar a sua microestrutura. As imagens da microestrutura, observadas no microscópio Olympus CX41, revelaram grãos alongados segundo a direção de laminação, identificando-se as zonas claras como sendo ferrite e as zonas mais escuras como sendo a perlite (Figura 3.19) [23].

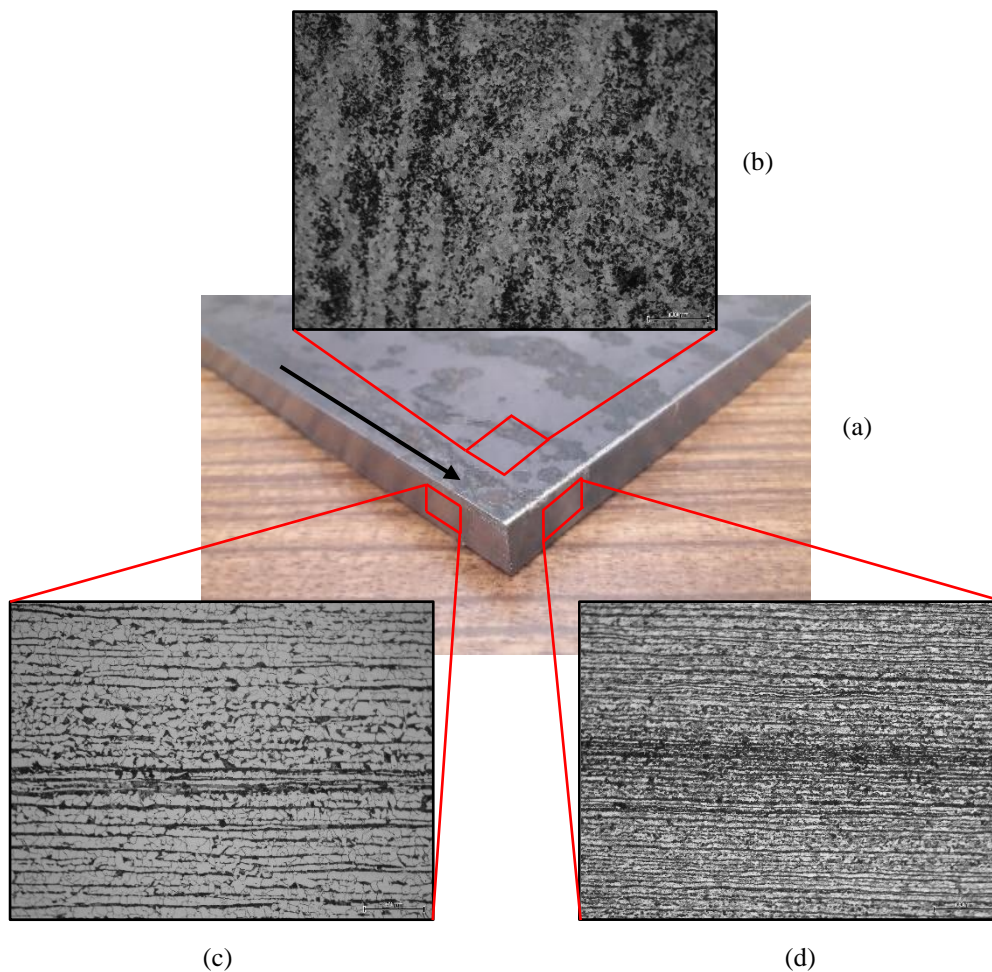


Figura 3.19 – Representação da microestrutura da chapa de aço ST52 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respetivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d).

Relativamente ao aço 2738, tratando-se de um aço de construção ligado, identificou-se facilmente a direção de laminação quando observado a olho nu. A nível da microestrutura, não se identificou nenhuma orientação preferencial, sendo apenas identificável a microestrutura martensítica (Figura 3.20). As amostras foram contrastadas também com o reagente Nital (solução a 2%).

Por último, relativamente ao aço R304, também laminado a quente, não foi possível obter imagens conclusivas em relação à sua microestrutura apesar de se ter utilizado o reagente *Vilella*, indicado para aços inoxidáveis. No entanto, sabe-se que se trata de um aço austenítico e não magnético [19] (Figura 3.21).

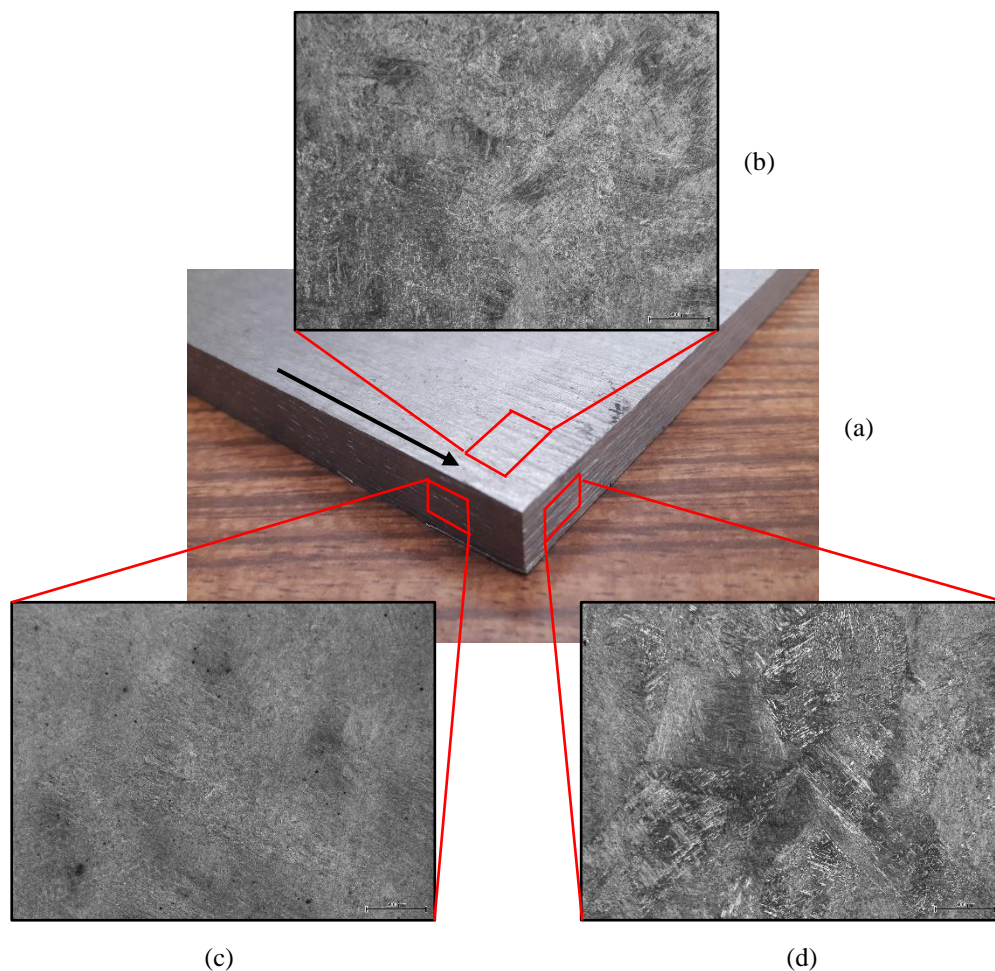


Figura 3.20 – Representação da microestrutura da chapa de aço 2738 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respetivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d).



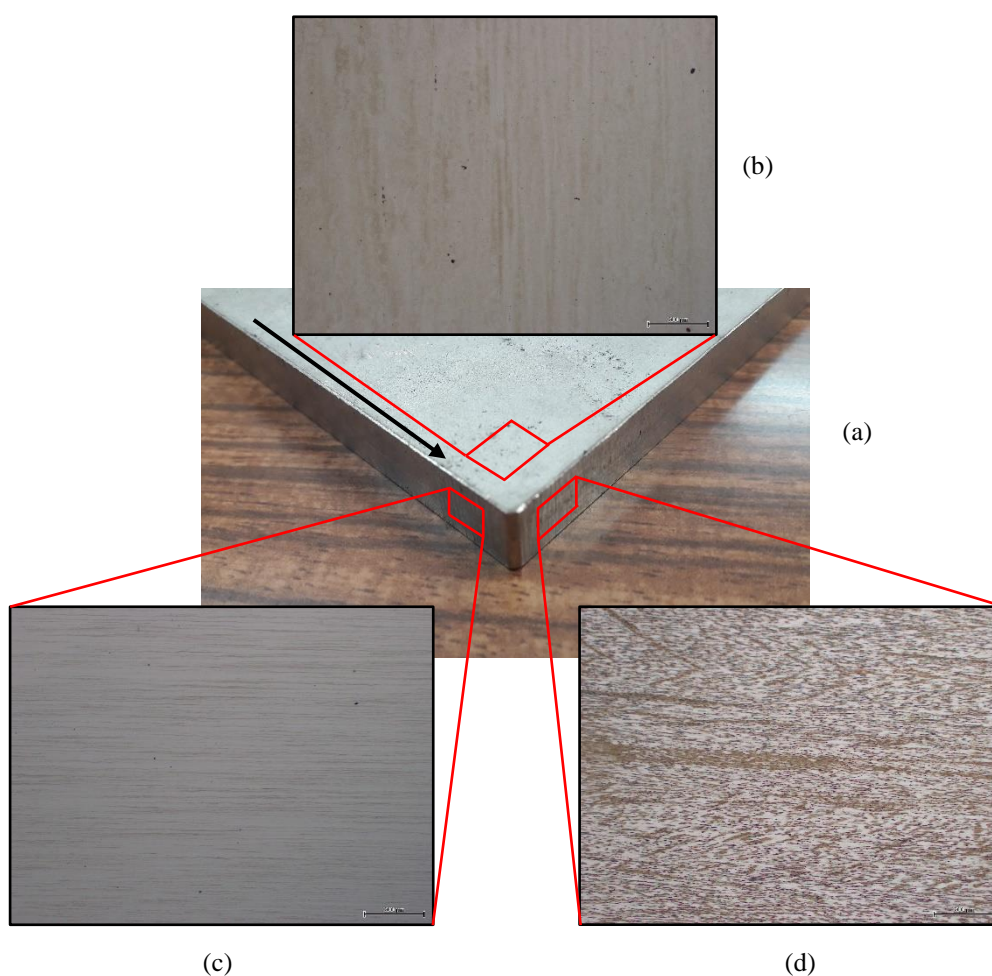


Figura 3.21 – Representação da microestrutura da chapa de aço R304 laminada segundo a direção da seta a preto (a) e respetivas vistas de Topo, Perfil e Frente, (b), (c) e (d).

### 3.6 Metodologia de análise de defeitos

Para a realização da análise quantitativa de defeitos presentes nas amostras, foi necessário proceder à preparação das amostras, de modo idêntico ao referido no subcapítulo 3.4.1. No entanto, para obter imagens de melhor qualidade e ao longo de uma linha da amostra, recorreu-se ao microscópio Leica DMI5000 M (Figura 3.22) do CENIMAT (Centro de Investigação em Materiais da FCT-UNL), com a colaboração do Senhor Professor Doutor Alexandre Velhinho.

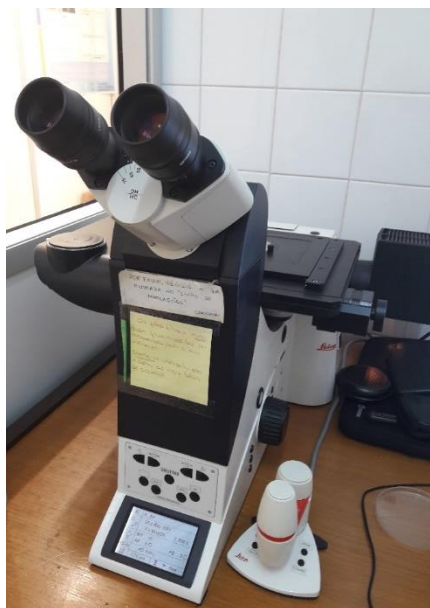


Figura 3.22 – Microscópio ótico invertido Leica DMI5000 M CENIMAT.

O *software* do microscópio ótico invertido permitiu, de forma automática, obter várias imagens seguidas perfazendo uma linha ao longo da amostra. Este microscópio permitiu ainda obter um foco melhor da amostra, uma vez que a parte observável da amostra assenta sobre o próprio microscópio, não sendo a imagem influenciada pela falta de paralelismo entre a face superior e inferior da amostra.

Para obter as várias fotografias do material, seleccionou-se uma linha horizontal no próprio *software* como exemplificado na Figura 3.23. Donde se obteve a fotografia *multistep* da amostra ST52-F-C (Figura 3.24).

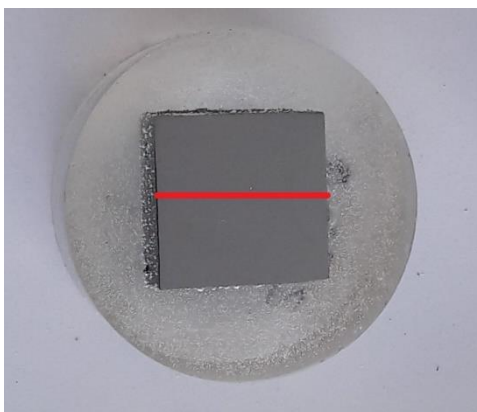


Figura 3.23 – Direção de fotografias no microscópio para análise quantitativa de defeitos.



Figura 3.24 – Fotografia *multistep* da amostra ST52-F-C, com identificação da fotografia S004.

Posteriormente, analisou-se cada imagem individual, sendo necessário para tal recorrer ao programa ImageJ para converter a imagem numa escala a preto e branco, e com a opção do *Threshold*, evidenciou-se apenas os defeitos (Figura 3.25). No entanto, em alguns casos não foi possível remover alguns riscos provenientes do polimento, pelo que não se contabilizou essa mesma imagem para a análise quantitativa de defeitos (Figura 3.26). Para as restantes amostras realizou-se o mesmo procedimento.

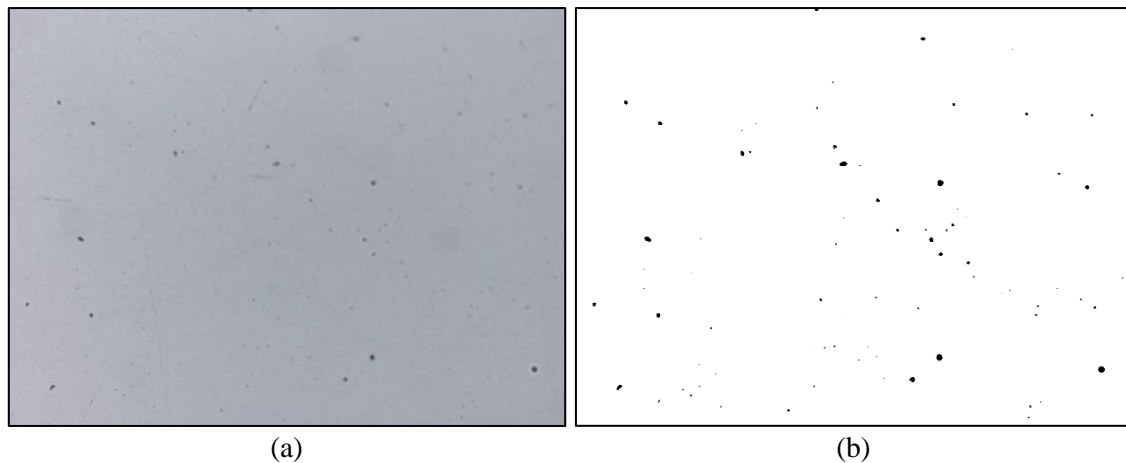


Figura 3.25 – Fotografia S004 da amostra ST52-F-C: (a) antes da aplicação da ferramenta *Threshold* e (b) com aplicação da ferramenta *Threshold*.

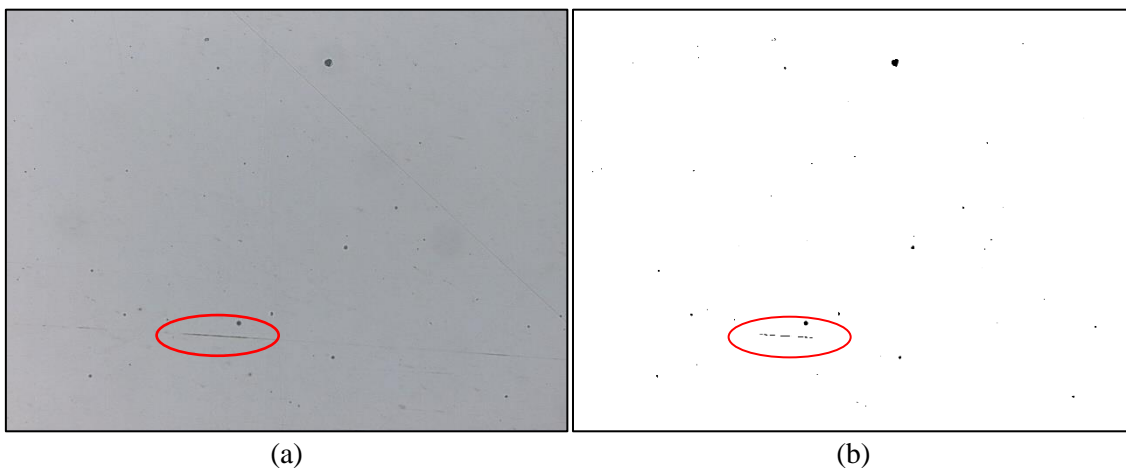


Figura 3.26 – Fotografias S014 da amostra R304-P-C: (a) antes da aplicação da ferramenta *Threshold* e (b) com aplicação da ferramenta *Threshold*.

### 3.7 Ensaios de desgaste

Os ensaios de desgaste foram realizados no equipamento *pin-on-disk* presente no laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT-UNL (Figura 3.27), de acordo com a norma ASTM G99-00 [13].

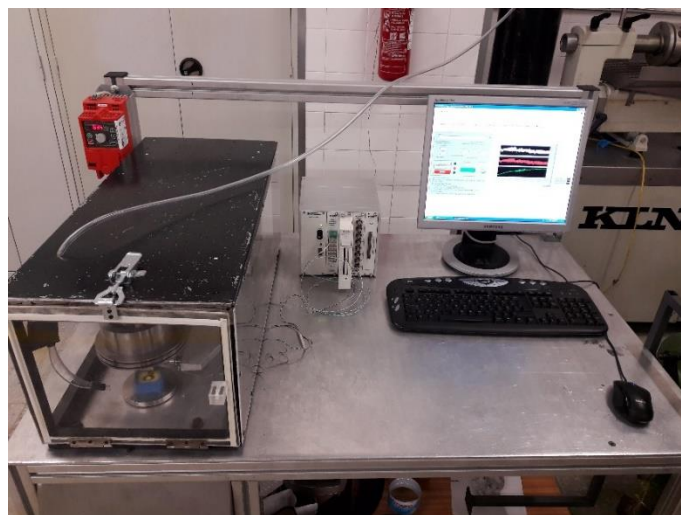
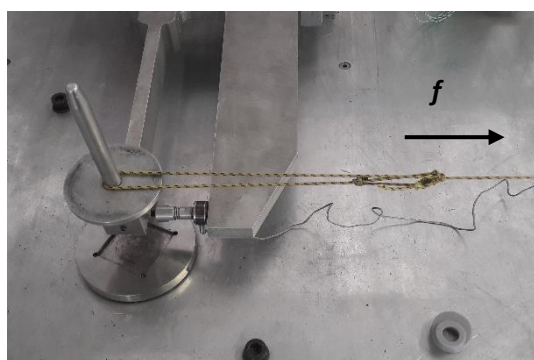
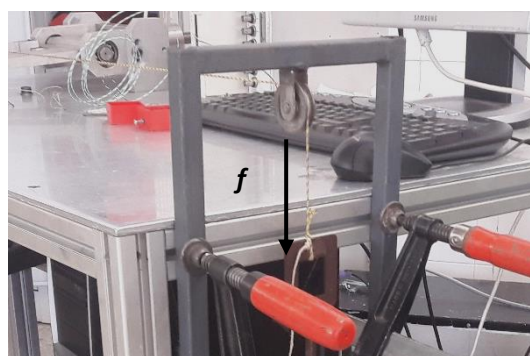


Figura 3.27 – Equipamento utilizado no ensaio de desgaste *pin-on-disk*.

O ensaio de desgaste, além de simular as condições de desgaste entre dois materiais, permite ainda obter o valor da força de atrito e posteriormente o coeficiente de atrito. Para obter os valores referidos, recorreu-se a uma célula de carga que necessitou de ser calibrada. A configuração da calibração está apresentada na Figura 3.28. Neste procedimento, utilizou-se uma corda presa ao suporte do pino e fez-se passar por uma roldana; converteu-se assim a direção da força aplicada (indicada na Figura 3.28 com a letra  $f$ ) de vertical para horizontal, simulando a compressão da célula durante o ensaio. A calibração foi feita com recurso a uma reta de calibração, na qual se aproxima uma reta aos pontos obtidos. O declive da reta,  $y=mx+b$ , dado por  $m$  corresponde ao coeficiente de calibração e  $b$  corresponde ao valor da ordenada na origem, ou seja, o valor devolvido pela célula quando não existe aplicação de forças.



(a)



(b)

Figura 3.28 – Metodologia de calibração do equipamento de desgaste: (a) fixação do fio ao suporte do pino e (b) pormenor da roldana para que o peso seja aplicado na vertical.



Na Figura 3.29 foram apresentados os pesos utilizados na calibração com as respectivas massas [g]. Na Tabela 3.2 encontram-se discriminadas as combinações de pesos usadas na calibração. Para minimizar os efeitos da carga e descarga das forças na célula de carga, optou-se pelo método de acréscimo de peso, sendo apenas necessário para os pesos de 25 N e 35 N, retirar 5 N para acrescentar 10 N. Esta limitação deve-se ao número insuficiente de pesos de 5 N.

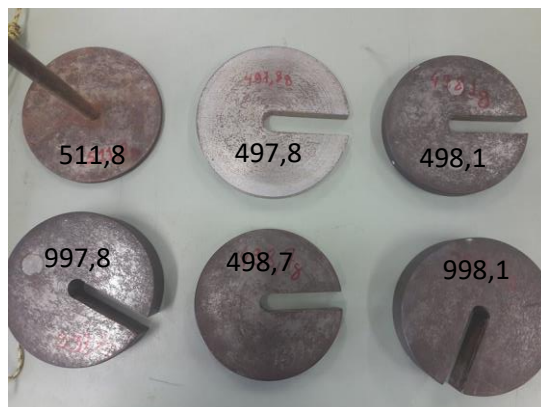


Figura 3.29 – Pesos utilizados no processo de calibração do equipamento e respetiva massa indicada em gramas [g].

Tabela 3.2 - Pesos utilizados no processo de calibração do equipamento de desgaste.

Pesos	Massa [g]	Força [N]
1	511,8	5
2	$511,8 + 497,8 = 1009,6$	10
3	$1009,6 + 498,1 = 1507,7$	15
4	$1507,7 + 498,7 = 2006,4$	20
5	$2006,4 - 498,7 + 997,8 = 2505,5$	25
6	$2505,5 + 498,7 = 3004,2$	30
7	$3004,2 - 498,7 + 998,8 = 3504,3$	35
8	$3504,3 + 498,7 = 4003$	40

Com os pesos e a ordem de aplicação definidos, mediu-se o valor devolvido pelo programa (Figura 3.30). A aplicação dos pesos calibrados foi feita com uma duração aproximada de 2 minutos, pelo que se obteve um gráfico com vários patamares (Figura 3.30), sendo que cada um corresponde ao valor lido pelo programa para cada peso aplicado. O gráfico da Figura 3.30 foi obtido através do programa de LabView de determinação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino (Anexo A: Figura A.1 e Figura A.2). Os valores foram obtidos usando um fator de calibração de uma unidade, desta maneira obteve-se o valor da extensão, uma vez que a célula de carga corresponde a um extensómetro no programa *Measurement and Automation Explorer*. Na realidade, a célula funciona com pelo menos quatro extensómetros acoplados

(*wheatstone bridge*). A curva de calibração relaciona a extensão com a carga aplicada, permitindo obter o fator de calibração, que converte o *output* da célula de carga em força.

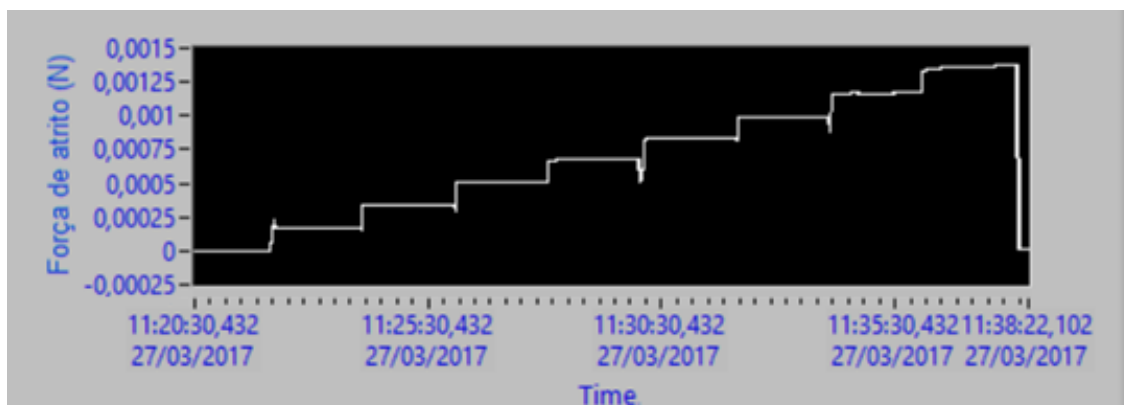


Figura 3.30 – Gráfico de calibração da célula de carga obtido do programa do Labview.

Com os dados obtidos construiu-se um gráfico de calibração, sendo apresentados os valores lidos pelo programa no eixo das abcissas e os valores conhecidos no eixo das ordenadas (Figura 3.31). Aplicando-se a linha de tendência obteve-se o seu declive que corresponde ao fator de calibração. O fator de calibração obtido foi de 30189, valor este utilizado durante os ensaios.

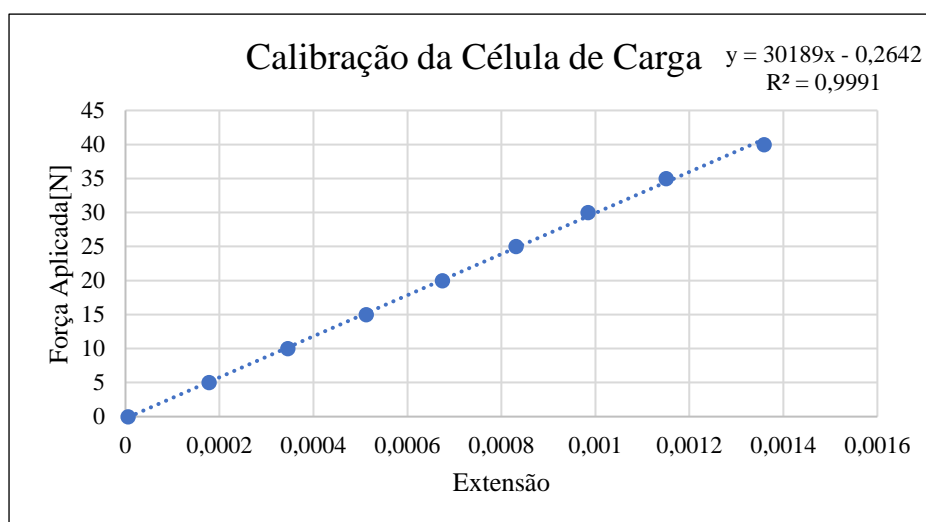


Figura 3.31 – Gráfico de calibração da célula de carga com linha de tendência e respectiva equação.

O aumento de temperatura que ocorre na zona de contacto do pino com a amostra, durante o ensaio, pode influenciar os resultados obtidos. Uma vez que o ensaio foi realizado com as amostras imersas, este facto podia evidenciar a oxidação da superfície dos materiais. Por isso, optou-se por adicionar um termopar ao ensaio. O termopar foi colocado no pino, o mais perto possível da zona de contacto (5 mm). Este também necessitou de ser calibrado.

Para a calibração do termopar utilizou-se um fervedor (Figura 3.32 (a)) e um prato de indução presentes no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL (Figura 3.32 (b)). Aqueceu-se a água até esta atingir o ponto de ebulição, que ocorre aos 100°C, sendo este o primeiro ponto de calibração. Esta temperatura foi comparada com um termómetro (Figura 3.32 (c)) suspenso num suporte universal (Figura 3.32 (d)), sendo de seguida desligado o prato de indução e retirados vários pontos a cada minuto, retirando-se um total de 13 pontos (Figura 3.33). A equação da linha de tendência indicou um fator de calibração de 0,98, valor muito próximo de 1.

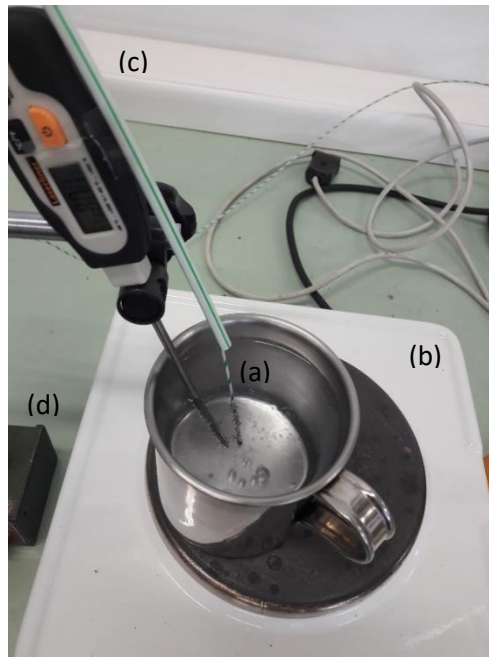


Figura 3.32 – Equipamentos utilizados para a calibração do termopar: (a) fervedor; (b) prato de indução; (c) termómetro e (d) suporte universal.

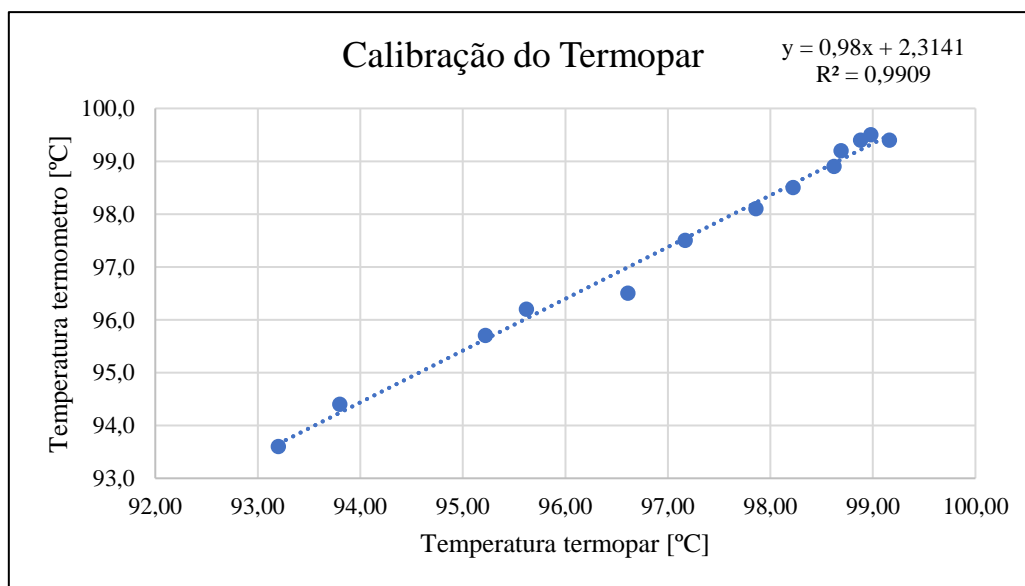


Figura 3.33 – Gráfico de calibração do termopar com linha de tendência e respetiva equação.

### 3.7.1 Preparação de amostras

O ensaio de desgaste do tipo *pin-on-disk* provoca uma pista de desgaste circular cujo diâmetro depende do aparelho, que neste estudo correspondeu a 16 mm, pelo que as dimensões das amostras tinham de ser superiores a este valor. Por outro lado, o suporte onde foi colocada a amostra limita a dimensão máxima da amostra em 30 mm de largura por 30 mm de comprimento.

Tendo em consideração as limitações impostas pelos equipamentos, cortou-se a chapa do material em tiras com 30 mm de largura, sendo posteriormente seccionada em amostras com 30 mm de comprimento e devidamente identificadas (Figura 3.34). Para as amostras dos outros materiais procedeu-se de modo idêntico, acrescentando a designação dos materiais, ou seja, ST52, 2738 e R304.

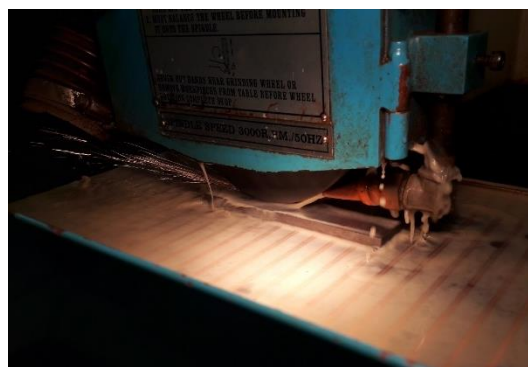
Segundo a norma dos ensaios de desgaste do tipo *pin-on-disk*, ASTM G99-00 [13], a superfície deve estar plana e livre de quaisquer impurezas e ainda deve apresentar um desvio médio aritmético do perfil de rugosidade,  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ], igual ou inferior a 0,8  $\mu\text{m}$ . O processo de retificação foi feito no equipamento SSG-2550AH da Sunlike presente no laboratório de Processamento Mecânico de Materiais do DEMI-FCT-UNL (Figura 3.35 (a)), que dispõe de uma mesa magnética para a fixação das amostras a serem retificadas (Figura 3.35 (b)).



Figura 3.34 – Amostras retificadas do aço ST52 para o ensaio de desgaste e respetiva identificação.



(a)



(b)

Figura 3.35 – Retificadora Sunlike SSG-2550AH (a) e pormenor da mesa de fixação e processo de retificação (b).

Foi também estudada a rugosidade das superfícies das amostras, através da obtenção dos valores de Ra da superfície dos diferentes materiais, antes do processo de retificação. Estes valores foram obtidos com o rugosímetro MARSURF PS10 da marca MAHR do laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL, tendo em consideração três orientações (Figura 3.36) uma vez que as chapas ao serem laminadas, apresentaram rugosidades diferentes dependendo da orientação (Tabela 3.3). As medições de rugosidade das amostras usadas no ensaio de desgaste forma feitas, também, segundo as três orientações (Figura 3.36 (c)).

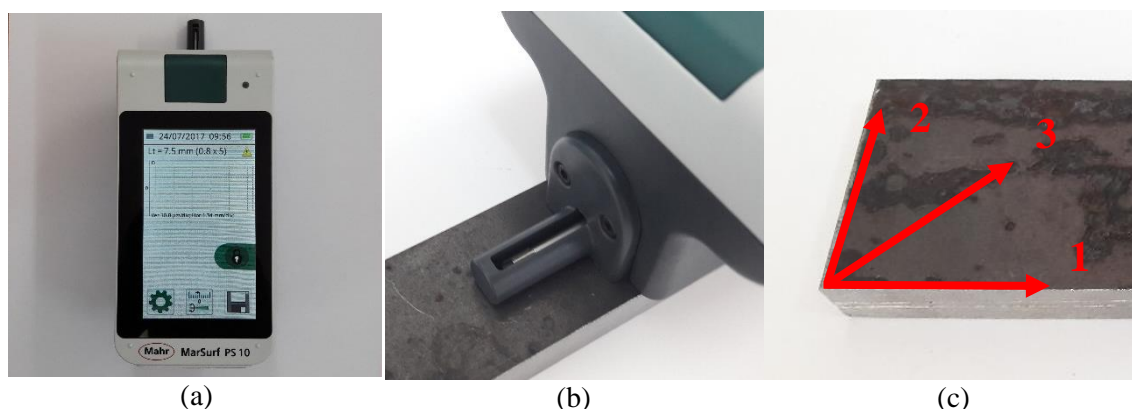


Figura 3.36 – Equipamento e metodologia utilizada para obtenção dos valores do acabamento superficial: (a) rugosímetro MAHR SURF; (b) pormenor da medição da rugosidade e (c) representação das três direções de medição do Ra.

Tabela 3.3 – Valores de Ra para os diferentes materiais tal como recebidos, segundo as três orientações.

Material	Direção	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
<b>ST52</b>	1	1,366
	2	1,469
	3	0,830
<b>2738</b>	1	3,394
	2	6,985
	3	2,627
<b>R304</b>	1	4,053
	2	4,114
	3	4,338

Antes de serem retificadas, as amostras do aço ST52 e do aço 2738 foram cortadas como explicado anteriormente (ver Figura 3.34). Por serem retificadas individualmente, tentou utilizar-se os mesmos parâmetros para garantir a equidade relativamente ao acabamento superficial de cada amostra, sem comprometer o requisito imposto pela norma ASTM G99-00 [13].

Relativamente ao aço R304, a abordagem de retificação de amostras foi ligeiramente diferente do procedimento anterior, uma vez que se trata de um aço austenítico, não magnético, o que levou a um método diferente para fixação das amostras à mesa da retificadora. Este método consistiu em usar uma prensa de aperto para segurar as amostras, sendo indispensável o uso de dois calços para garantir o paralelismo da amostra em relação à mesa da retificadora (Figura 3.37).

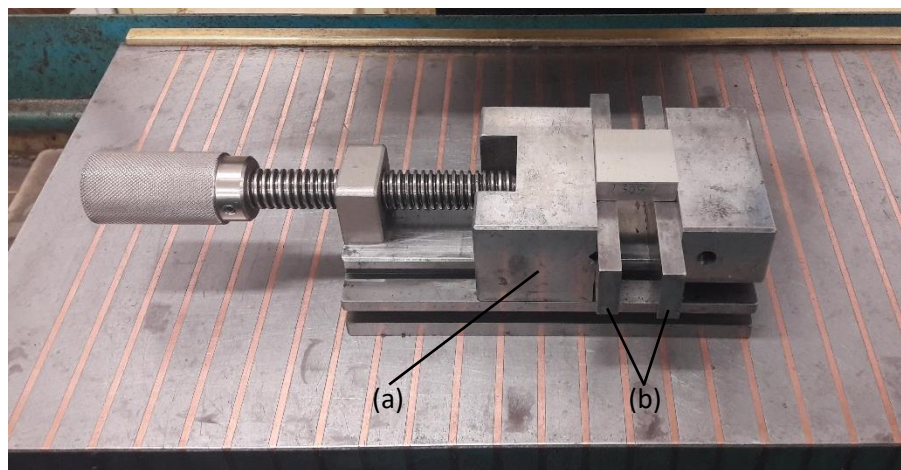


Figura 3.37 – Prensa de aperto (a) e calços (b) utilizados para fixar as amostras do aço R304.

Após a retificação de cada amostra procedeu-se à medição do  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] de modo a verificar se este valor se é aceitável para a realização do ensaio de desgaste segundo a norma [13], ou seja, valor inferior a  $0,8 \mu\text{m}$ . A tabela 3.4 engloba os resultados da rugosidade obtidos em cada direção, para cada amostra, de cada material.

Tabela 3.4 – Valores de  $Ra$  obtidos para cada material após retificação.

Medição do $Ra$ em cada direção para cada amostra [ $\mu\text{m}$ ]				
Aço	Amostra	Direção		
		1	2	3
ST52	A	0,104	0,071	0,104
	B	0,140	0,087	0,176
	C	0,152	0,081	0,148
	D	0,141	0,082	0,159
	F	0,059	0,137	0,127
	H	0,129	0,062	0,132
	I	0,155	0,050	0,093
	J	0,109	0,088	0,115
	L	0,053	0,032	0,049

Medição do <i>Ra</i> em cada direção para cada amostra [ $\mu\text{m}$ ] (continuação)				
Aço	Amostra	Direção		
		1	2	3
2738	A	0,136	0,100	0,148
	B	0,119	0,114	0,135
	C	0,138	0,109	0,128
	D	0,172	0,070	0,187
	F	0,093	0,049	0,082
	G	0,047	0,104	0,104
	H	0,099	0,048	0,073
	I	0,184	0,141	0,167
	J	0,104	0,211	0,195
R304	B	0,503	0,239	0,455
	C	0,482	0,264	0,487
	D	0,244	0,202	0,246
	F	0,197	0,130	0,207
	G	0,246	0,093	0,220
	H	0,346	0,191	0,343
	I	0,123	0,226	0,253
	J	0,157	0,302	0,306
	K	0,150	0,077	0,278

### 3.7.2 Preparação do ensaio

Como já foi referido anteriormente, esta tese tem por objetivo a caracterização ao desgaste de três materiais diferentes, para fabrico de um parafuso sem fim, da indústria de tratamento de resíduos sólidos. Desta forma, o autor propôs a utilização de três lixos orgânicos diferentes, com o intuito de criar o ambiente de serviço. Os processos de preparação destes lixos são objetos de estudo deste subcapítulo.

O primeiro lixo (Lixo-1) foi obtido com um limão triturado até formar uma pasta (Figura 3.38) para ser aplicada no suporte de fixação da amostra. Do limão aproveitou-se tanto a casca como o sumo, excluindo-se apenas os caroços uma vez que estes apresentaram uma dimensão superior a 5 mm. Partículas dessa dimensão acabam por não ter grande influência no ensaio por serem facilmente afastadas pela superfície lateral do pino.





Figura 3.38 – Lixo-1: (a) limão e (b) mistura utilizada no ensaio.

O segundo lixo (Lixo-2) foi obtido a partir do primeiro lixo adicionando-lhe pedaços de vidro. Esta nova variável poderá afetar o desgaste na medida em que provoca desgaste abrasivo, com isso, maior arrancamento de partículas da superfície dos materiais. Os pedaços de vidro foram obtidos a partir de um copo de vidro, que foi partido com um martelo até se obter partículas inferiores a 1 mm (Figura 3.39).



Figura 3.39 – Lixo-2: (a) da esquerda para a direita, limão e vidro e (b) mistura utilizada no ensaio.

Por último, o terceiro lixo (Lixo-3) foi obtido recorrendo a cascas de ovos, cascas de batata e a limão. Numa primeira fase partiu-se a casca de dois ovos em pedaços pequenos, tendo sido misturado e triturado com as cascas de batata e finalmente o limão (Figura 3.40). No final obteve-se uma pasta de textura idêntica ao primeiro lixo.

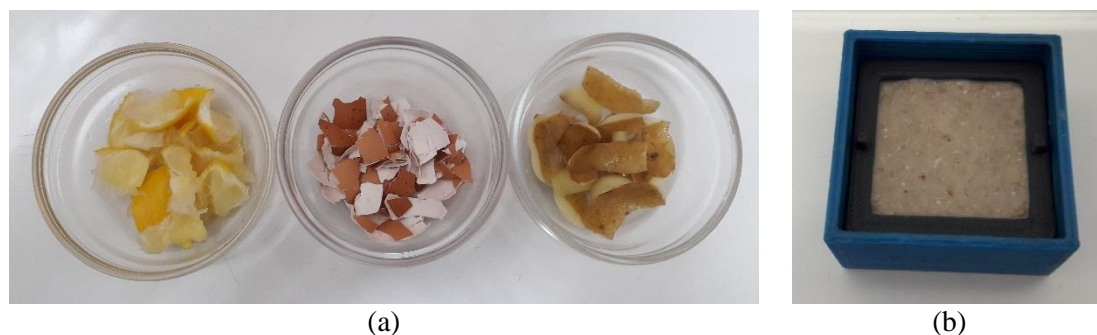


Figura 3.40 – Lixo 3: (a) da esquerda para a direita, limão, casca de ovo e casca de batata e (b) mistura utilizada no ensaio.



Como referido no início deste capítulo, o ensaio de desgaste *pin-on-disk* baseia-se no uso de um pino que provoca uma pista de desgaste numa amostra. Segundo a norma ASTM G99-00 [13], o pino deve apresentar uma ponta hemisférica pelo que foi necessário arredondar o pino (Figura 3.41). Para obter uma ponta hemisférica no pino, foi necessário colocá-lo no engenho de furar do laboratório de Processamento Térmico de Materiais do DEMI-FCT-UNL, e com uma lixa P600 realizaram-se movimentos semicirculares manualmente, como indicado pela seta na Figura 3.42 (a). Posteriormente procedeu-se à sua observação no microscópio (Figura 3.42 (b)). Este processo foi realizado antes de cada ensaio para obter a maior conformidade possível entre os ensaios.



Figura 3.41 – Pino utilizado no ensaio de desgaste: (a) antes de ser arredondado e (b) após.

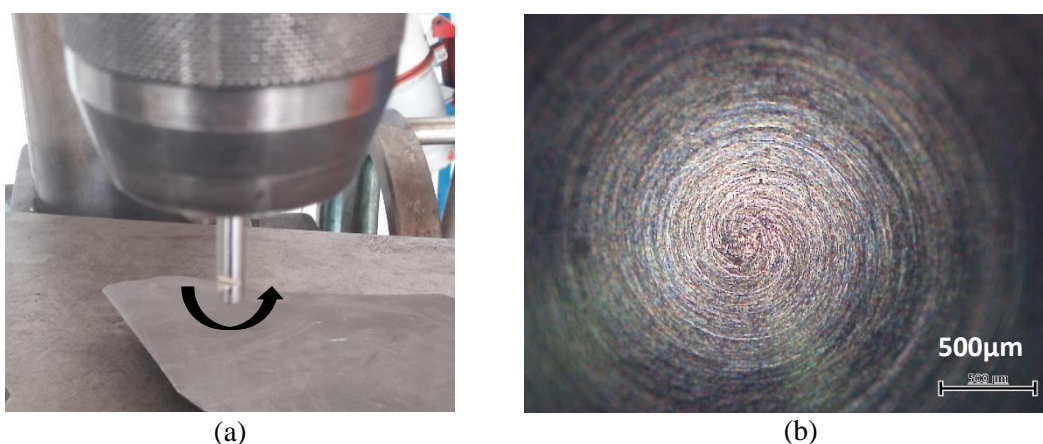


Figura 3.42 – Colocação do pino no engenho de furar (a) e verificação do pino no microscópio (b).

Nos procedimentos de ensaio de desgaste é necessário medir a massa perdida da amostra e do pino. Relativamente ao pino, considerou-se desprezável a sua perda de massa dado que a dureza do carboneto de tungsténio (aproximadamente 1300 HV) é bastante superior à do material em estudo mais duro (320 HV). No entanto, foi verificado se esta poderia ser considerada desprezável, através do cálculo da variação de massa do pino, entre ensaios. Para tal, antes da montagem do pino no equipamento *pin-on-disk* foi pesado na balança AND GR-200 do laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT-UNL (Figura 3.43). Segundo a norma

ASTM G99-00, a balança deve ter uma resolução de 0,0001 g [13]. Para se obter uma correta medição, o pino foi limpo com álcool etílico para eliminar qualquer resíduo provocado pelo processo de arredondamento, ou gordura proveniente do seu manuseamento.

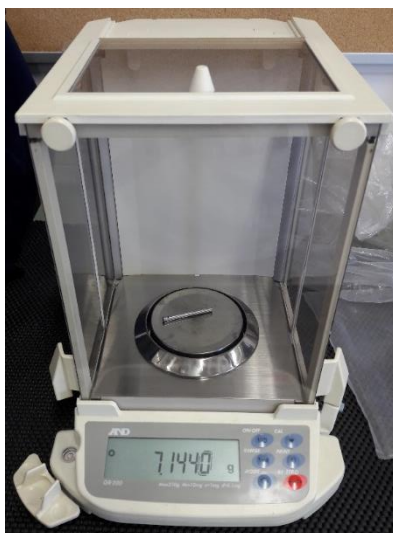


Figura 3.43 – Balança de precisão AND GR 200 presente no laboratório de Caracterização de Materiais do DEMI-FCT/UNL.

Uma vez que se pretende ter informação relativa à temperatura no pino no decorrer do ensaio, abriu-se um rasgo a 5 mm da ponta do pino (Figura 3.44 (a)) onde se colocou um termopar tipo K (Figura 3.44 (b)) com massa térmica e fita *Kapton* (Figura 3.44 (c)). Em vez de um rasgo, o mais aconselhado a nível de fixação do termopar seria um furo. No entanto, como o pino é de carboneto de tungsténio, e dadas as reduzidas dimensões do pino, não foi viável. O rasgo tem a vantagem de se poder limpar no final de cada ensaio.

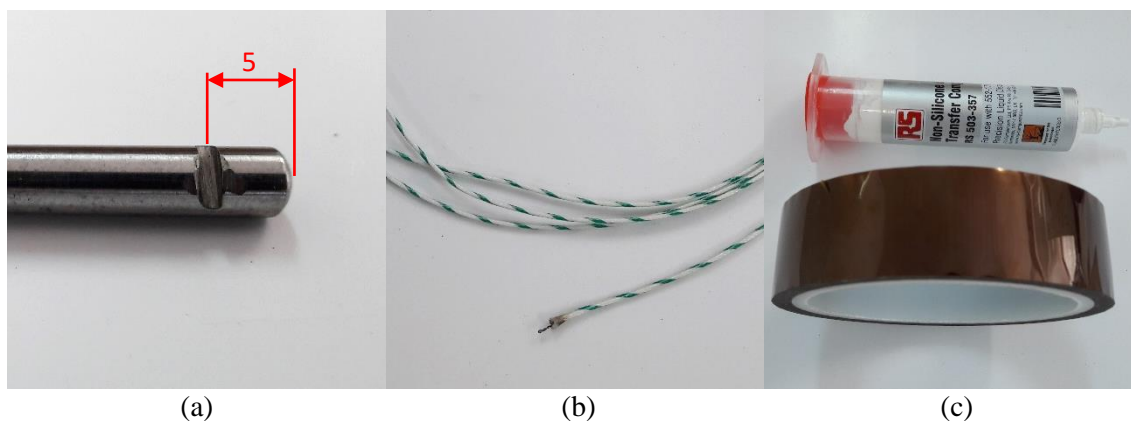


Figura 3.44 – Material utilizado na medição da temperatura: (a) abertura do rasgo no pino; (b) termopar tipo K e (c) massa térmica e fita *Kapton*.

Relativamente às amostras, estas foram pesadas (Figura 3.45 (a)), num processo idêntico ao da pesagem do pino. Ou seja, a amostra foi limpa para evitar sujidades do manuseamento e de lubrificante presente na superfície da amostra. Depois de pesada, a amostra foi colocada no suporte de fixação e introduzido o espaçador entre esta e as paredes da caixa (Figura 3.45 (b)) e pesou-se novamente o conjunto. Para quantificar a quantidade de lixo colocado, pesou-se o conjunto (o suporte de fixação da amostra, a amostra, o espaçador) e o respetivo lixo (Figura 3.45 (c)).

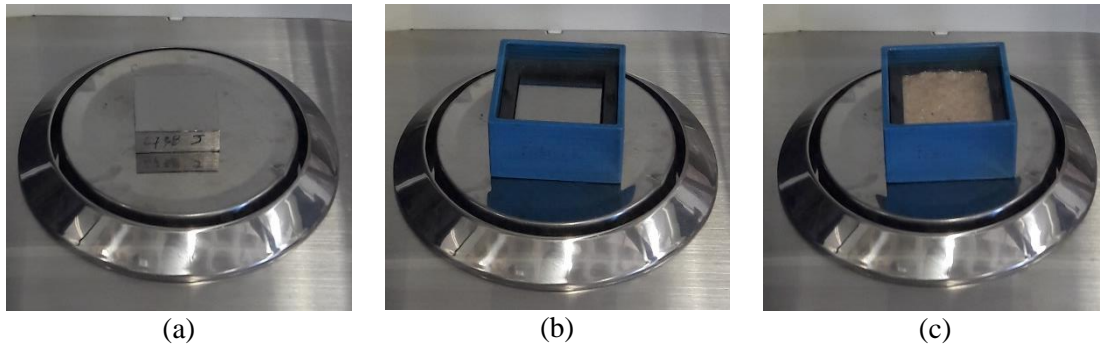


Figura 3.45 – Pesagem antes da realização do ensaio: (a) amostra; (b) conjunto sem o lixo e (c) conjunto com o respetivo lixo.

Como referido anteriormente no capítulo 2, o ensaio de desgaste depende de vários parâmetros como é o caso da velocidade de rotação, da carga aplicada e da duração do ensaio. Uma vez que não se teve acesso aos dados da velocidade de rotação e da carga aplicada no Parafuso Sem Fim, foi necessário realizar alguns ensaios para que se chegasse aos parâmetros que se considerou mais adequados. Partindo da velocidade na zona de interação entre o pino e a amostra, de 0,1 m/s, obteve-se a velocidade de rotação da amostra, que por sua vez permitiu determinar a velocidade de rotação do motor, através das Equações 2 e 3.

$$V_p = \omega_a \times r \times \frac{2\pi}{60} \quad (2)$$

Onde,  $V_p$  representa a velocidade linear na pista em [m/s],  $\omega_a$  representa a rotação da amostra em [rpm] e  $r$  o raio da pista de desgaste em [m].

$$\omega_m = \omega_a \times 7 \quad (3)$$

Onde,  $\omega_m$  representa a rotação do motor em [rpm], tendo em consideração uma relação de transmissão de 7.

A rotação do motor obtida foi de 835,4 rpm. No entanto, como o controlador do motor elétrico (Figura 3.46) apenas permitiu ajustar às unidades a velocidade de rotação, arredondou-se o valor por defeito para 835 rpm. Os parâmetros de ensaio obtidos encontram-se na Tabela 3.5.



Figura 3.46 – Controlador do motor elétrico.

Tabela 3.5 – Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste.

Parâmetros	Valores Calculados	Valores usados
$V_p$ [m/s]	0,1	0,1
$r$ [mm]	8	8
$\omega_a$ [rpm]	119,34	119,29
$\omega_m$ [rpm]	835,4	835
$D$ [m]	180	180
$t$ [s]	1800	1800

Tendo os parâmetros relativos às velocidades definidos, realizou-se três ensaios fazendo variar a carga aplicada, nomeadamente, 16,93N, 30,84N e 41,14N. Com os resultados obtidos construiu-se um gráfico que relacionava a carga aplicada com a massa perdida da amostra (Figura 3.47).

As duas forças aplicadas de 16,93 N e 30,84 N demonstraram um desgaste bastante reduzido comparativamente com o desgaste provocado pela carga de 41,14 N, no entanto, através de observação das pistas de desgaste verificou-se que estas eram semelhantes. Podendo concluir-se que o acréscimo da carga apenas levou a um desgaste mais rápido e um aumento exponencial de volume perdido, por essas razões, optou-se pela carga aplicada de 41,14 N para os ensaios de desgaste.

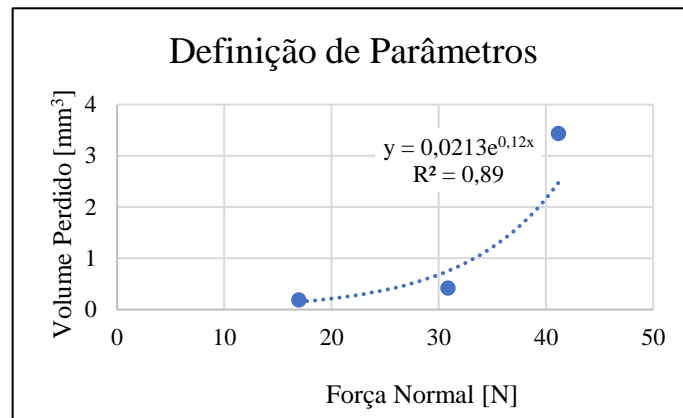


Figura 3.47 – Gráfico para definição do parâmetro força normal, que relaciona o volume perdido com a força normal.

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 Ensaio de dureza

O tratamento de dados relativos à dureza foi realizado seguindo o procedimento experimental descrito no capítulo 3 deste documento.

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos da dureza para cada face dos três materiais, tendo cada face três amostras. As indentações foram realizadas na direção vertical das amostras, garantindo o espaçamento necessário entre cada uma (Figura 4.1 e Figura 4.2).

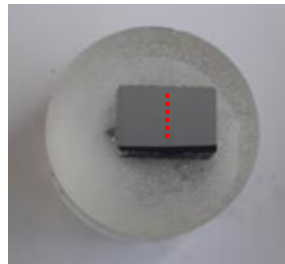


Figura 4.1 – Representação simplificada da direção das indentações feitas na amostra 2738-P-C.

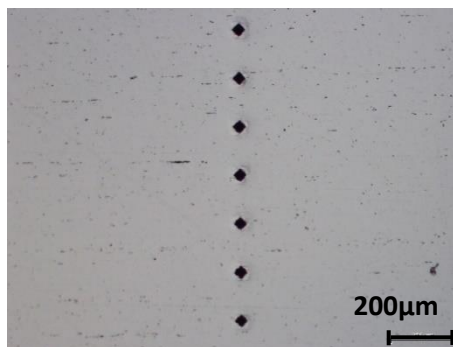


Figura 4.2 – Imagem do microscópio Olympus CX41 das indentações realizadas na amostra ST52-P-C.

Segundo a norma ASTM E384-16 [20], os resultados têm de ser apresentados com um intervalo de confiança de 95%. Desta forma, foram realizadas 6 a 7 indentações nas amostras e calculou-se a média dos valores obtidos de dureza Vickers, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95%. Recorreu-se ao programa Minitab, um programa de estatística, onde se construíram os gráficos de probabilidades para garantir que os resultados seguiam uma distribuição normal. Estes gráficos recorrem ao parâmetro AD (Anderson-Darling), que permite calcular o valor-p e assim verificar se os dados seguem ou não a distribuição normal. Se o valor-p for inferior a  $\alpha$  ( $\alpha = 0,05$  uma vez que se pretendia um intervalo de confiança de 95%), concluiu-se que os dados não seguem a distribuição normal. Quanto maior for o valor-p melhor o ajuste da distribuição aos dados obtidos.

A título de exemplo, a Figura 4.3 apresenta o gráfico de probabilidade para as indentações da amostra ST52-F-A onde se obteve um valor- $p = 0,543$ , valor este superior aos 0,05, mostrando assim que os resultados seguem uma distribuição normal, como requerido pela norma ASTM E384-16 [20].

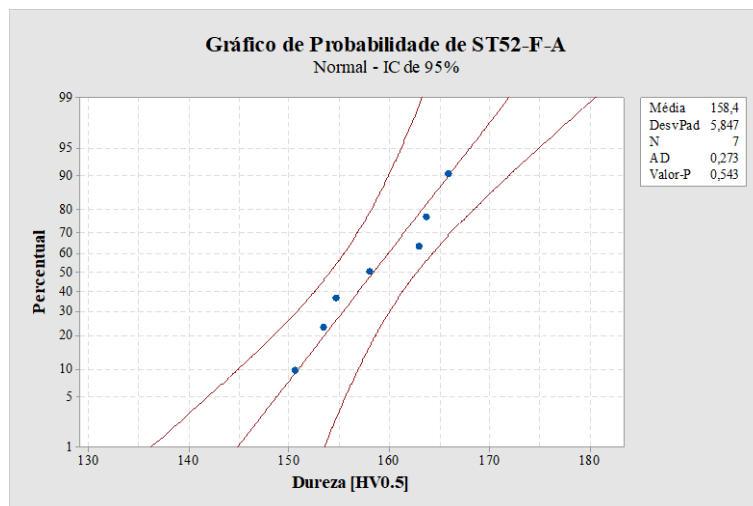


Figura 4.3 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-A.

Tendo em consideração a quantidade de ensaios realizados, os gráficos de probabilidade das restantes amostras foram apresentados em anexo (Anexo B), confirmando também que estes seguiam uma distribuição normal.

O gráfico de probabilidade relativo às durezas da amostra ST52-F-B (Anexo B:Figura B.1) foi o que apresentou melhor ajuste a uma distribuição normal. Para este gráfico obteve-se um valor- $p$  muito próximo de 1 (valor- $p=0,922$ ) e um desvio padrão de 2,077.

Relativamente à amostra R304-F-A (Anexo B: Figura B.18), foi a que apresentou o valor- $p$  mais baixo (valor- $p = 0,087$ ). Apesar de ser um valor muito baixo, ainda se considerou que os resultados seguiam uma distribuição normal por ser maior que 0,05.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da dureza obtidos para a amostra ST52-F-A, onde se indica a posição relativa da indentação, a medição de cada uma das diagonais e por fim o valor obtido pelo equipamento referente à dureza do material. Os resultados das durezas das restantes amostras foram obtidos de igual modo (ver Anexo C), tendo sido apresentadas as médias dos mesmos na tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-A.

ST52-F-A					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	2,000	77,44	78,08	153,3
2	0,000	2,300	75,11	75,75	162,9
3	0,000	2,600	76,31	76,95	157,9
4	0,000	3,200	74,45	75,09	165,8
5	0,000	3,500	77,13	77,77	154,6
6	0,000	3,800	74,97	75,61	163,6
7	0,000	4,700	78,18	78,82	150,5
Dureza Vickers Média					158,4
Desvio Padrão					5,85
Intervalo de Confiança de 95%					4,33

Tabela 4.2 – Quadro resumo da média das durezas [HV] por amostra e por material.

	F-A	F-B	F-C	P-A	P-B	P-C	T-A	T-B	T-C
ST52	158,4	157,6	157,7	151,1	151,2	149,0	156,6	156,4	149,8
2738	322,4	319,4	319,0	321,3	317,6	319,5	323,7	318,6	317,3
R304	159,5	157,3	158,5	157,7	160,8	158,6	160,7	158,3	161,2

Relativamente ao aço idêntico ao original, o ST52, seria de esperar uma tensão de rutura de aproximadamente 520 MPa, que convertendo para a escala de durezas em Vickers, corresponde a aproximadamente 150 HV. Tendo em consideração os valores apresentados imediatamente acima, foi possível constatar que as amostras da face de Perfil (P) apresentaram uma dureza média de  $150,4^{+0,8}_{-1,4}$  HV 0,5, as amostras da face de Frente (F) apresentaram uma dureza média de  $157,9^{+0,5}_{-0,3}$  HV 0,5 e por último, as amostras de Topo (T) apresentaram uma dureza média de  $154,3^{+2,3}_{-4,5}$  HV 0,5. Pelo que, considerando todas as amostras do aço ST52, verificou-se uma dureza média de  $154,2^{+4,2}_{-5,2}$  HV 0,5, valor este próximo do valor esperado.

Relativamente ao aço 2738, as médias das durezas para as faces de Frente, Perfil e Topo foram de  $320,3^{+2,1}_{-1,3}$  HV 0,5,  $319,5^{+1,8}_{-1,6}$  HV 0,5 e  $319,9^{+3,8}_{-2,6}$  HV 0,5, respetivamente. Pelo que a dureza média para o material foi de  $319,9^{+3,8}_{-2,3}$  HV 0,5.

Por último, relativamente ao aço R304, a face de Frente apresentou uma dureza de  $158,4^{+1,1}_{-1,1}$  HV 0,5, ao passo que as faces de Perfil e de Topo apresentaram uma dureza de  $159,0^{+1,8}_{-1,3}$  HV 0,5 e  $160,1^{+1,1}_{-1,8}$  HV 0,5, respetivamente, sendo a dureza média final do aço R304 de  $159,2^{+2}_{-1,9}$  HV 0,5.

Os resultados das durezas dos três aços têm como utilidade a aplicação de modelos matemáticos de previsão de durabilidade, permitindo assim estimar a vida útil do componente.



## 4.2 Análise quantitativa de defeitos

Os defeitos presentes na amostra podem ser essenciais para a estimação da durabilidade do mesmo, uma vez que funcionam como zonas de concentração de tensões que podem levar à iniciação de fissuração e mais tarde à rutura. Para a deteção dos defeitos, como referido no subcapítulo 3.6, utilizou-se a ferramenta *Threshold* do ImageJ (ver Figura 3.25). Para a contagem de defeitos e medição das respetivas áreas, as imagens obtidas através do microscópio Leica DMI5000 M do CENIMAT foram sujeitas a análise com a ferramenta *Analyse Particles* também do ImageJ. É de referir que a menor área detetada pelo programa ImageJ é de  $8,6\text{E-}08 \text{ mm}^2$  com a escala utilizada para as imagens.

Este tratamento foi realizado para cada fotografia que cobre uma área de  $2,7\text{E-}01 \text{ mm}^2$  da superfície da amostra. Após esse tratamento de imagem, foi construída a Tabela 4.3. As análises quantitativas de defeitos para as restantes amostras foram estudadas de modo idêntico, chegando-se à conclusão que o estudo quantitativo de defeitos da área da fotografia S004 da amostra R304-F-C era o mais representativo.

Os diferentes valores das áreas foram distribuídos em intervalos, representados por classes: a classe A para defeitos com uma área inferior a  $1,00\text{E-}07 \text{ mm}^2$ , a classe B para defeitos com área compreendida entre  $1,00\text{E-}07 \text{ mm}^2$  e  $1,00\text{E-}06 \text{ mm}^2$ , a classe C para defeitos com área compreendida entre  $1,00\text{E-}06 \text{ mm}^2$  e  $1,00\text{E-}05 \text{ mm}^2$ , a classe D para defeitos com área compreendida entre  $1,00\text{E-}05 \text{ mm}^2$  e  $1,00\text{E-}04 \text{ mm}^2$  e a classe E para defeitos com área superior a  $1,00\text{E-}04 \text{ mm}^2$ , como mostra a Tabela 4.4.

Após tratamento de imagem das fotografias da amostra ST52-F-C, que corresponde à vista de Frente da chapa do aço ST52, condensou-se todos os resultados (número de defeitos e respetivas áreas), obtendo-se um total de 759 defeitos nesta amostra (Figura 4.4 (a)), com uma média de 85 defeitos por imagem. Concluiu-se, deste tratamento de imagens, que para este material, o menor defeito detetado apresentou uma área de  $8,6\text{E-}08 \text{ mm}^2$  e o maior defeito apresentou uma área de  $2,2\text{E-}04 \text{ mm}^2$ .

A amostra ST52-P-B, que corresponde à vista de Perfil da chapa de aço ST52 apresentou um total de 3001 defeitos sendo a média por fotografia de 231 defeitos (Figura 4.4 (b)). Relativamente ao maior defeito observado, apresentou uma área de  $1,9\text{E-}04 \text{ mm}^2$ .

Relativamente à vista de Topo da chapa de aço ST52, amostra ST52-T-C, foram detetados no total 2184 defeitos e a média de defeitos por fotografia foi de 312 (Figura 4.4 (c)). Por sua vez, o maior defeito apresentou uma área de  $1,3\text{E-}04 \text{ mm}^2$ .

Tabela 4.3 - Contagem de defeitos e respetiva área da fotografia S004 da amostra R304-F-C.

ST52-F-C_S004							
Defeito	Área [mm <sup>2</sup> ]	Defeito	Área [mm <sup>2</sup> ]	Defeito	Área [mm <sup>2</sup> ]	Defeito	Área [mm <sup>2</sup> ]
1	8,1E-06	22	1,2E-05	43	8,6E-07	64	9,4E-07
2	8,6E-08	23	2,6E-07	44	1,9E-06	65	1,2E-06
3	1,4E-05	24	2,6E-07	45	8,6E-08	66	6,8E-07
4	3,4E-07	25	4,3E-07	46	2,6E-07	67	8,6E-08
5	1,9E-06	26	7,3E-06	47	8,6E-08	68	3,9E-05
6	1,3E-05	27	6,9E-06	48	2,7E-06	69	8,6E-08
7	7,6E-06	28	3,3E-06	49	5,3E-06	70	5,1E-07
8	2,9E-06	29	4,2E-06	50	2,5E-06	71	2,4E-05
9	6,8E-06	30	2,8E-05	51	1,2E-05	72	2,6E-07
10	5,8E-06	31	1,8E-05	52	2,7E-06	73	1,9E-05
11	1,4E-05	32	6,0E-07	53	5,5E-06	74	1,2E-06
12	6,8E-07	33	3,3E-06	54	3,2E-06	75	2,6E-06
13	1,0E-06	34	5,1E-07	55	1,6E-05	76	1,6E-06
14	1,1E-05	35	1,3E-05	56	2,7E-06	77	3,3E-06
15	1,9E-05	36	7,7E-06	57	1,7E-07	78	3,5E-06
16	3,8E-06	37	1,7E-07	58	2,2E-06	79	1,1E-06
17	3,2E-05	38	1,7E-07	59	2,6E-07	80	4,4E-06
18	1,5E-06	39	2,6E-06	60	3,1E-06	81	1,4E-06
19	4,2E-06	40	1,7E-06	61	3,4E-07	82	4,4E-06
20	3,5E-05	41	8,6E-08	62	1,5E-06	83	2,7E-06
21	1,5E-05	42	7,7E-07	63	3,8E-05		

Tabela 4.4 – Distribuição de áreas em diferentes classes.

Classe	Área [mm <sup>2</sup> ]
A	]0;1,00E <sup>-07</sup> ]
B	]1,00E <sup>-07</sup> ;1,00E <sup>-06</sup> ]
C	]1,00E <sup>-06</sup> ;1,00E <sup>-05</sup> ]
D	]1,00E <sup>-05</sup> ;1,00E <sup>-04</sup> ]
E	]1,00E <sup>-04</sup> ;+∞[

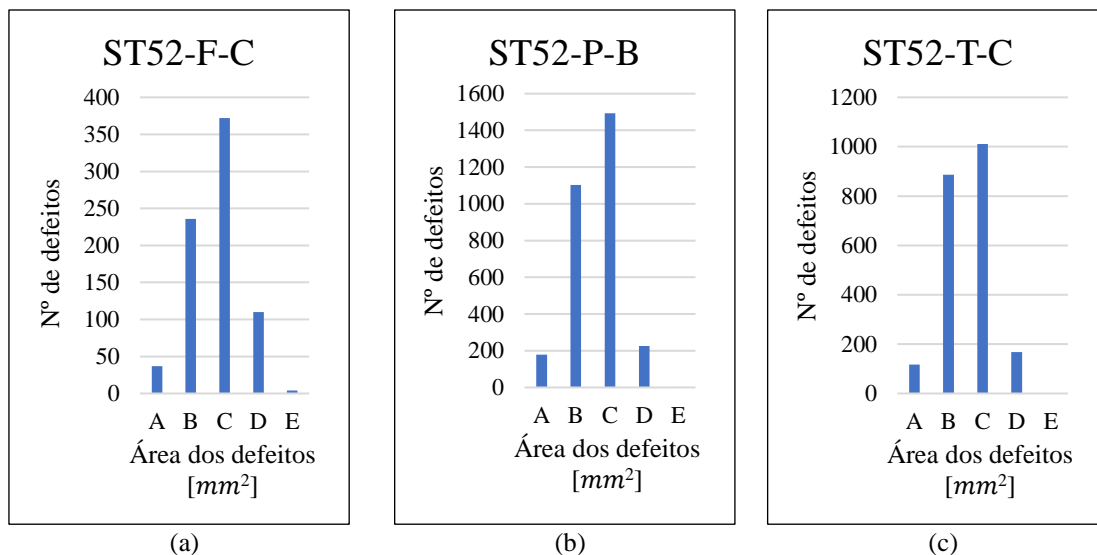


Figura 4.4 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) ST52-F-C; (b) ST52-P-B e (c) ST52-T-C.

A Figura 4.5 apresenta o número de defeitos detetados para as amostras do aço 2738. No caso da amostra 2738-F-B ( Figura 4.5 (a)), que corresponde à vista de Frente, obteve-se um total de 698 defeitos, com uma média de 54 defeitos por fotografia. Tendo o maior defeito, uma área de  $1,1E-04 \text{ mm}^2$ .

Em relação à vista de Perfil (Figura 4.5 (b)), a amostra 2738-P-C apresentou um total de 443 defeitos e uma média de 35 defeitos por fotografia. O maior defeito apresentou uma área de  $3,8E-04 \text{ mm}^2$ .

Relativamente à face de Topo (Figura 4.5 (c)), ou seja, a amostra 2738-T-C, observou-se um total de 493 defeitos, com 25 defeitos por fotografia em média. O maior defeito apresentou uma área de  $6,8E-04 \text{ mm}^2$ .

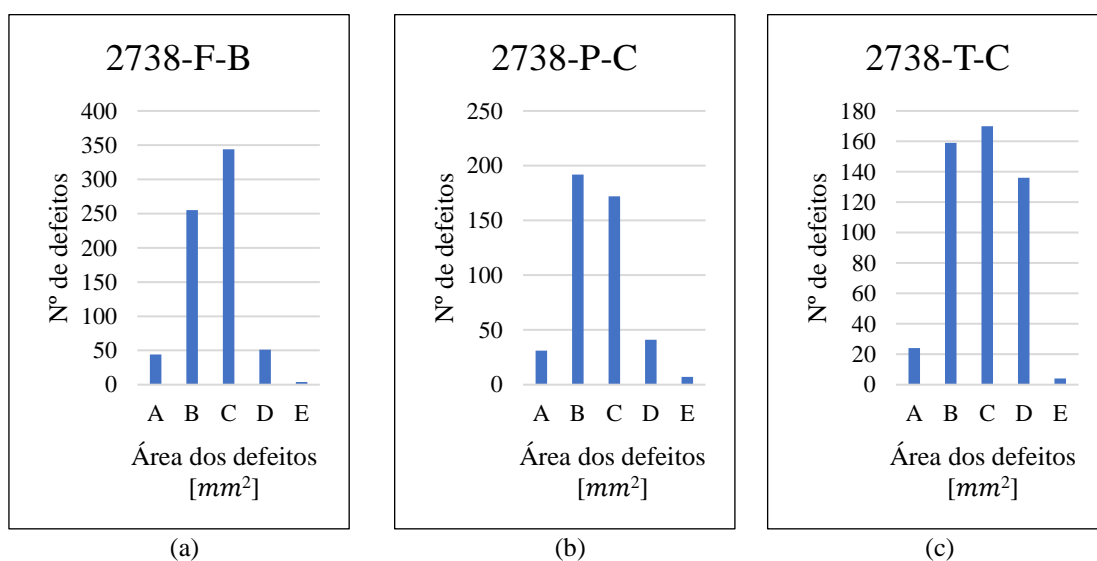


Figura 4.5 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) 2738-F-C; (b) 2738-P-B e (c) 2738-T-C.

Relativamente à chapa de aço inoxidável R304, nomeadamente a amostra R304-F-C, da vista de Frente, observou-se um total de 787 defeitos, sendo a média por fotografia de 57 defeitos. O maior defeito detetado apresentou uma área de  $2,0E^{-03} \text{ mm}^2$ . (Figura 4.6 (a))

Na amostra R304-P-C, vista de Perfil da chapa, foram observados 1025 defeitos, sendo a média por fotografia de 94 defeitos. O maior defeito detetado apresentou uma área de  $3,0E^{-03} \text{ mm}^2$  (Figura 4.6 (b)).

Por último, na face de Topo da chapa do aço R304, detetou-se um total de 1761 defeitos, sendo a média por fotografia de 93 defeitos. O maior defeito presente na amostra R304-T-C apresentou uma área de  $7,3E^{-05} \text{ mm}^2$  (Figura 4.6 (c)).

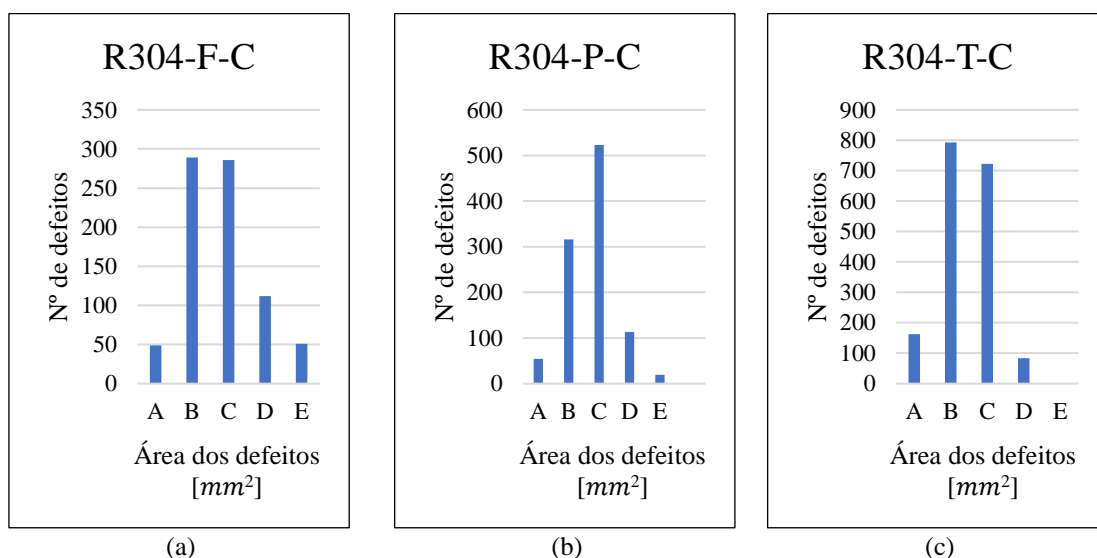


Figura 4.6 – Gráfico de distribuição de defeitos por áreas: (a) R304-F-C; (b) R304-P-B e (c) R304-T-C.

Os resultados obtidos dos defeitos dos três aços têm como utilidade a aplicação de modelos matemáticos de previsão de durabilidade, permitindo assim estimar a vida útil do componente.

### 4.3 Ensaio de desgaste

Como já foi referido no subcapítulo 3.7.2, os ensaios de desgaste foram testados em três ambientes distintos, sendo designados respetivamente por limão (Lixo-1), limão e vidro (Lixo-2) e limão, cascas de ovos e cascas de batatas (Lixo-3), em três aços diferentes, nomeadamente ST52, 2738 e R304. As amostras testadas foram devidamente retificadas e limpas com álcool para eliminar sujidades e gorduras, tendo sido pesadas antes e depois do ensaio para ser calculada a massa de material perdido, seguindo o procedimento referido no subcapítulo 3.7.2.

Durante o ensaio de desgaste mediu-se a força de atrito, o coeficiente de atrito e a temperatura no pino, dados apresentados sob a forma de gráficos em função do tempo (Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9), permitindo avaliar a evolução dos mesmos durante o ensaio. Os valores lidos diretamente da célula de carga apresentavam alguma dispersão, resultando num gráfico extremamente denso (aquisição de 10 dados por segundo durante 1800 s), o que levou à necessidade de realizar tratamento de dados recorrendo a uma sub-rotina em Matlab (Anexo D) que calculou a média dos valores lidos a cada segundo, devolvendo assim apenas um valor por cada segundo de ensaio.

O primeiro ensaio foi realizado para a amostra C do aço ST52 com o lixo 1, ou seja, limão triturado, cujos valores da força de atrito, inicialmente apresentam uma tendência crescente desde os 4,9 N até estabilizar a partir de 6 N (Figura 4.7). O coeficiente de atrito foi calculado a partir da força de atrito lida pela célula, consequentemente o gráfico apresenta exatamente a mesma tendência evolutiva. Os valores do coeficiente de atrito evoluíram de 0,12 até estabilizarem nos 0,14 (Figura 4.8).

Como esperado, a temperatura no pino acompanhou o crescimento do coeficiente de atrito, estabilizando apenas no final do ensaio ST52-C Lixo-1 (Figura 4.9). À medida que o coeficiente de atrito sobe, também a temperatura sobe. No entanto, este aumento ocorre desfasado de alguns segundos em parte devido à distância a que o termopar se encontra da zona de contacto entre o pino e a amostra.

Na amostra ST52-C, foi possível identificar oxidação na superfície em toda a área de contacto do aço com o lixo. Contudo, a pista de desgaste apresentou uma superfície limpa, sem evidências de arrancamento de material (Figura 4.10).

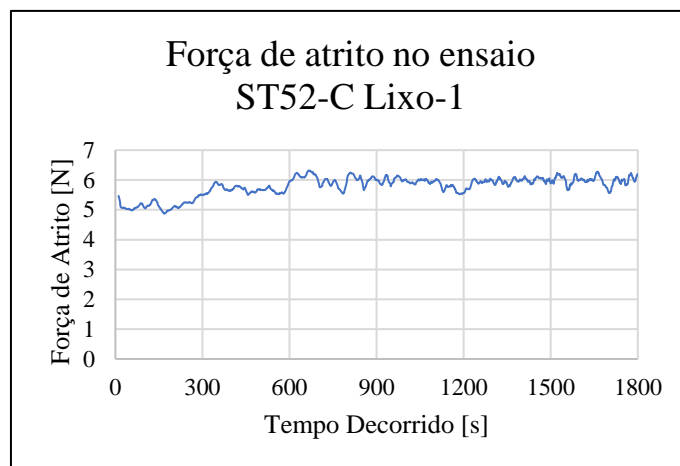


Figura 4.7 – Gráfico da força de atrito em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1.

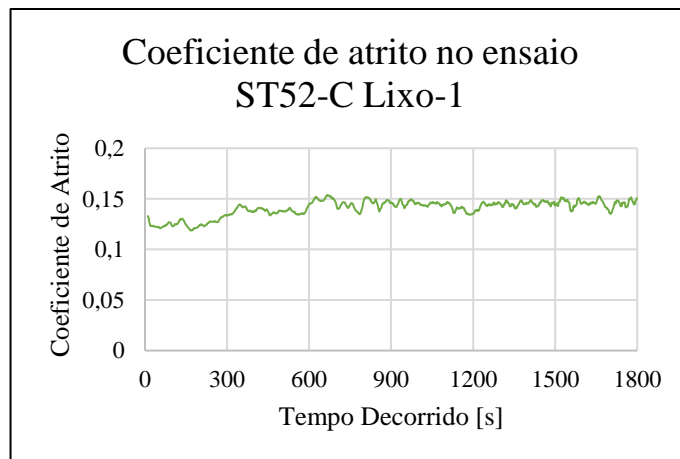


Figura 4.8 – Gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1.

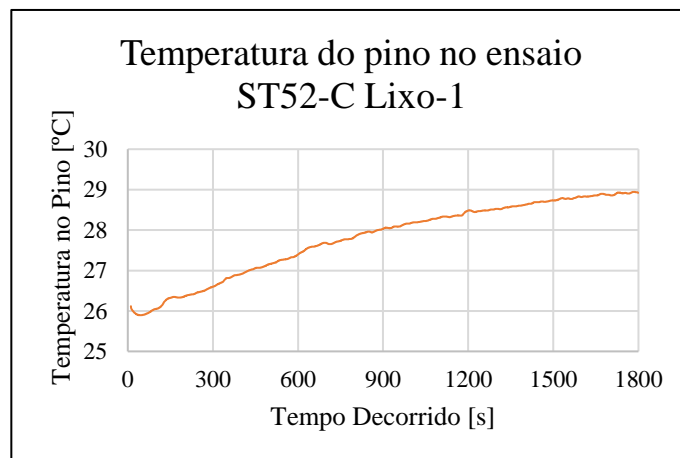
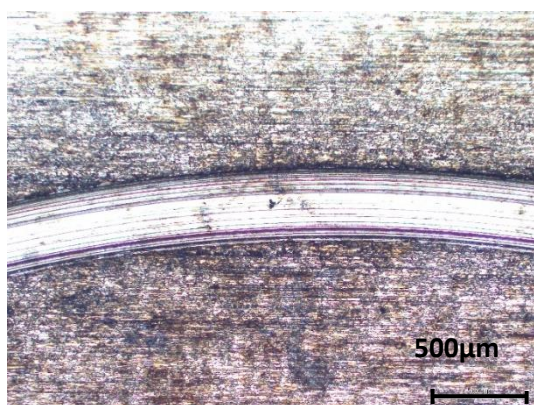


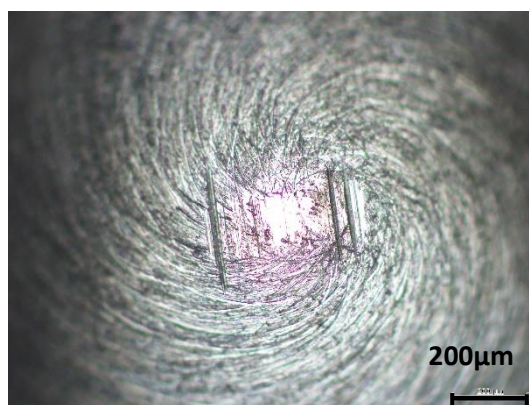
Figura 4.9 – Gráfico da temperatura no pino em função do tempo para o ensaio ST52-C Lixo-1.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10 – Amostra após a realização do ensaio ST52-C Lixo-1: amostra (a); Micrografias da pista de desgaste (b) e da ponta do pino (c).

Tendo em consideração que foram realizados 27 ensaios, neste subcapítulo realizou-se a discussão de resultados relativos ao desgaste, mas os respectivos gráficos e imagens foram apresentadas em anexo (Anexo E).

Os restantes ensaios realizados para o aço ST52 com o lixo 1 (Anexo E: Figura E.1 e Figura E.2) mostraram conformidade entre os resultados de força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino, tendo os gráficos progressões idênticas ao do ensaio ST52-C Lixo-1. Apenas no ensaio ST52-D houve um aumento pontual da força de atrito até aos 8 N, correspondente ao coeficiente de atrito de 0,2, verificados aos 1080 segundos. Esta variação foi acompanhada de um aumento de temperatura de 0,5 °C aproximadamente 20 segundos mais tarde (Anexo E: Figura E.1 (a), (b) e (c)).

As três amostras do aço 2738 para o lixo 1 apresentaram resultados bastante consistente entre eles. Nos três ensaios, os resultados da força de atrito mantiveram-se entre os 6 N e os 7 N e o do coeficiente de atrito na ordem dos 0,15, ambos com uma tendência constante. A temperatura aumentou desde a temperatura ambiente até aos 29,5 °C (Anexo E: Figura E.3, Figura E.4 e Figura E.5).

Por outro lado, o aço R304 sob ação do lixto 1 revelou um aumento da força de atrito em relação aos outros dois materiais, com comportamento aproximadamente constante e igual a 10 N, correspondendo a um coeficiente de atrito de 0,24 (Anexo E: Figura E.6 (a) e (b)). Como seria expectável, o aumento do coeficiente de atrito implicou um aumento da temperatura, aproximando-se esta dos 32 °C (Anexo E: Figura E.6 (c)). A superfície da amostra não sofreu influência do lixto (Anexo E: Figura E.6 (d)). Do ensaio resultou uma pista de desgaste bem definida e o pino permaneceu praticamente intacto (Anexo E: Figura E.6 (e) e Figura E.6 (f)).

Os resultados obtidos da força de atrito e do coeficiente de atrito para as amostras C e D do aço R304, também ensaiadas sob ação do lixto 1, confirmaram os resultados obtidos no ensaio R304-B Lixo-1, com valores de 10 N para a força de atrito, de 0,24 para o coeficiente de atrito e 32 °C para a temperatura no pino (Anexo E: Figura E.7 (a), (b) e (c) e Figura E.8 (a), (b) e (c)). É de salientar que nos três ensaios do material R304 com o Lixo-1, a força de atrito e consequentemente o coeficiente de atrito apresentaram, respetivamente, um valor elevado de 25 N e 0,6 nos instantes iniciais dos ensaios, estabilizando nos valores de 10 N de força de atrito e 0,24 de coeficiente de atrito, ao fim de 60 segundos de ensaio.

A análise visual da superfície e da pista de desgaste das três amostras do material R304 permitiu concluir que, a nível corrosivo, o lixto 1 teve pouca influência sobre os resultados, tal como seria de esperar em amostras de um aço inoxidável (Anexo E: Figura E.6 (d) e (e), Figura E.7 (d) e (e) e Figura E.8 (d) e (e)).

Na Figura E.9 do Anexo E foram apresentados os gráficos e as fotografias do ensaio realizado com a amostra H do aço ST52 sob ação do lixto 2, onde se verificou a existência de dois estágios. Um primeiro estágio com a força de atrito a variar entre 10 e 15 N, o coeficiente de atrito a variar entre 0,2 e 0,4 e a temperatura a alcançar os 32°C. No segundo estágio a força de atrito atingiu um valor máximo de 23 N, estabilizando 100 segundos depois, no valor de aproximadamente 17 N. Neste segundo estágio a temperatura atingiu os 42 °C. A diferença entre os dois estágios pode ser devida à presença das partículas de vidro, uma vez que quanto maior a largura da pista de desgaste maior a probabilidade de acumulação de partículas promovendo o aumento da força de atrito.

Da análise visual da superfície da amostra ST52-H, da pista de desgaste e da ponta do pino, verifica-se uma diminuição da ação corrosiva por parte do lixto 2 face aos ensaios realizados com o lixto 1 (Anexo E: Figura E.9 (d)) e verifica-se também um desgaste adesivo com arrancamento de material (Anexo E: Figura E.9 (e)).



Relativamente à amostra F do aço ST52, também sob ação do lixto 2, esta apresentou um primeiro estágio idêntico ao ensaio anterior (ST52-H Lixo-2), com a força de atrito a variar entre 10 e 15 N e o coeficiente de atrito a variar entre 0,2 e 0,38. No entanto, apenas na fase final do ensaio surgiram evidências do segundo estágio, com a força de atrito a aumentar até aos 21 N (Anexo E: Figura E.10 (a)), o coeficiente de atrito a atingir o valor de 0,5 (Anexo E: Figura E.10 (b)) e a temperatura a alcançar os 40 °C (Anexo E: Figura E.10 (c)).

Visualmente, o ensaio ST52-F Lixo-2 apresentou indícios idênticos ao ensaio anterior (ST52-H Lixo-2) (Anexo E: Figura E.10 (d) e (e)). Contudo, a ponta do pino não apresenta uma superfície gasta uniformemente, a zona central da área de contacto apresentou menor desgaste que as zonas circundantes (Anexo E: Figura E.10 (f)).

Os ensaios realizados com as amostras do aço 2738 sob ação do lixto 2 revelaram coerência de resultados, nos três ensaios (Anexo E: Figura E.12 (a) e (b)), Figura E.13 (a) e (b) e Figura E.14 (a) e (b)). Os valores da força de atrito e do coeficiente de atrito, apesar de apresentarem alguma flutuação, mantiveram-se nos 6,8 N e nos 0,16, respetivamente. A temperatura foi aumentando, partindo da temperatura ambiente até atingir o máximo de 33,5°C (Anexo E: Figura E.12 (c), Figura E.13 (c) e Figura E.14 (c)).

Da análise das imagens da amostra do aço 2738-H Lixo-2 constatou-se uma alteração de coloração na superfície da amostra após ensaio e arrancamento de material na pista (Anexo E: Figura E.14), em comparação com os ensaios 2738-B Lixo-2 e 2738-I Lixo-2 (Anexo E: Figura E.12 e Figura E.13).

A presença das partículas de vidro provocou um desgaste mais evidente nos ensaios realizados com o aço R304. A nível da força de atrito e do coeficiente de atrito, os ensaios (R304-Lixo-2) mostraram que os valores se mantiveram aproximados dos 11 N e 0,3 nos três ensaios (Anexo E: Figura E.15 (a) e (b), Figura E.16 (a) e (b) e Figura E.17 (a) e (b)). Contudo, a presença das partículas fez-se notar essencialmente pelo aparecimento de picos nos gráficos, onde a força de atrito alcançou os 20 N e o coeficiente de atrito alcançou os 0,5. Estes picos ocorreram por breves instantes, possivelmente devido ao carácter variável da presença das partículas na zona de contacto do pino com a amostra. No que respeita à temperatura, esta alcançou os 36 °C nos três ensaios (Anexo E: Figura E.15 (c), Figura E.16 (c) e Figura E.17 (c)), mas no caso da amostra R304-I (Anexo E: Figura E.15 (c)) a temperatura alcançou um máximo de 54,5 °C resultante do aumento da força de atrito para os 27,7 N quando decorridos 1400 segundos de ensaio. O mesmo aconteceu para o segundo ensaio (R304-J Lixo-2), em que o valor máximo da força de atrito foi de 28 N aos 1200 segundos. No entanto, como a força de atrito só se manteve nesse patamar durante 200 segundos, consequentemente, a temperatura máxima alcançada foi de 49 °C, acabando por voltar aos 36 °C passados os 200 segundos (Anexo E: Figura E.16 (c)).

Para as três amostras do aço ST52 sob influência do lixó-3, observou-se uma força de atrito e coeficiente de atrito com algumas variações entre os 5 N e os 10 N e entre os 0,1 e 0,23, respetivamente (Anexo E: Figura E.18, Figura E.19 e Figura E.20). Foi apenas observável uma alteração destes valores no caso da amostra ST52-I que alcançou uma força de atrito de 14 N, voltando a baixar progressivamente (Anexo E: Figura E.18 (a)). A temperatura alcançou os 32°C (Anexo E: Figura E.18 (c)). Estas alterações são, provavelmente, devidas ao facto de os ensaios não serem realizados em simultâneo. Por este motivo, e tal como esperado, o lixó preparado vai entrando em decomposição, alterando as suas propriedades.

No ensaio 2738-J Lixo-3, a força de atrito variou entre 4 N e 8 N, resultando numa variação de coeficiente de atrito entre 0,1 e 0,2 (Anexo E: Figura E.21 (a) e (b)). Por sua vez, o ensaio 2738-F Lixo-3 apresentou uma variação inferior à do ensaio (2738-J Lixo-3), variando entre 2 N e 6 N, correspondendo a um coeficiente de atrito a variar entre 0,05 e 0,15 (Anexo E: Figura E.22 (a) e (b)). Por último, o ensaio 2738-G Lixo-3 apresentou uma variação entre 6 N e 8 N, o que corresponde a uma variação entre 0,15 e 0,2 para o coeficiente de atrito (Anexo E: Figura E.23 (a) e (b)).

A maior alteração observável nos três ensaios realizados para o aço 2738 sob influência do Lixo-3 foi na coloração da superfície das amostras. O ensaio 2738-J Lixo-3 foi o que apresentou uma superfície mais escura, indiciando a ocorrência de corrosão superficial, ao passo que no ensaio seguinte (2738-F Lixo-3), a corrosão foi menos evidente, ainda que comparável (Anexo E: Figura E.21 (d) e Figura E.22 (d)). No entanto, o ensaio 2738-G Lixo-3 apresentou uma superfície praticamente sem corrosão, uma vez que foi realizado com um novo lixó (sem tempo de decomposição), utilizando a mesma composição do Lixo-3 (Anexo E: Figura E.23 (d)).

O ensaio R304-H Lixo-3 apresentou uma força de atrito de aproximadamente 6 N e um coeficiente de atrito de 0,15. No entanto, verificou-se um máximo de 17 N e 0,42 para a força de atrito e para o coeficiente de atrito, respetivamente, estabilizando 150 segundos depois nos 6 N de força de atrito e 0,15 de coeficiente de atrito (Anexo E: Figura E.24 (a) e (b)). Por sua vez, o ensaio R304-K Lixo-3 apresentou vários picos ao longo do ensaio, principalmente nos primeiros 500 segundos (Anexo E: Figura E.25 (a) e (b)). Por último, o ensaio R304-F Lixo-3 apresentou valores de força de atrito próximos de 10 N e valores de 0,2 para o coeficiente de atrito. É de salientar que também surgiram vários picos que atingiram valores de 20 N para a força de atrito ao longo do ensaio (Anexo E: Figura E.26 (a) e (b)). Os três ensaios realizados com o aço R304 sob ação do Lixo-3 não apresentaram evidência da ocorrência de corrosão na superfície das amostras (Anexo E: Figura E.24 (d), Figura E.25 (d) e Figura E.26 (d)).

Como referido no subcapítulo 3.7.2, as amostras foram pesadas antes e depois da realização de cada ensaio, obtendo-se assim a variação da massa, ou seja, a massa perdida durante o ensaio. No entanto, em conformidade com a norma ASTM G99-00 [13], os valores foram apresentados sob a forma de volume perdido [mm<sup>3</sup>] (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Volume da amostra perdido para cada amostra de cada material e cada lixó.

Volume perdido da amostra [mm <sup>3</sup> ]			
Material/Lixo	Lixo 1	Lixo 2	Lixo 3
ST52	0,1538	0,2436	0,0897
	0,3077	0,5641	0,1282
	0,1538	0,5897	0,0769
2738	0,3462	0,5641	0,0128
	0,5385	0,5128	0,0897
	0,3590	0,7436	0,1282
R304	0,1154	1,5000	0,2179
	0,1795	1,3590	0,1410
	0,1026	0,5897	0,1410

Sendo o aço ST52 idêntico ao material original (ver Tabela 3.1), considerou-se os valores obtidos como base de comparação para o aço 2738 e para o aço R304, com o objetivo de serem apresentados como possíveis soluções alternativas. Apesar do aço 2738 ser um aço de baixa liga apresentando uma dureza média (320 HV) bastante superior à do ST52 (154 HV), não se verificou uma melhoria em relação ao comportamento ao desgaste. A média do volume perdido para o aço ST52 sob ação do Lixo-1 foi de 0,2051 mm<sup>3</sup>, enquanto que a média do volume perdido para o aço 2738 sob ação do mesmo lixó foi de 0,4146 mm<sup>3</sup>.

O aço R304, sendo um aço inoxidável e, portanto, caracterizado por uma maior resistência à corrosão, não se revelou como alternativa, pois na presença do lixó com partículas de vidro, foi o que apresentou maior desgaste, sendo a média do volume perdido de 1,1496 mm<sup>3</sup>, praticamente 10 vezes maior que a média do volume perdido para o aço R304 sob ação do Lixo-1 (apenas orgânico) que foi de 0,1325 mm<sup>3</sup>.

A presença do vidro na composição do lixó provocou um aumento no desgaste dos materiais, evidenciando-se principalmente no aço R304.

Relativamente à perda de massa do pino, a maior variação que se verificou foi de 0,0003 g. Esta variação apresentou um valor de tal maneira reduzido que se considerou desprezável o desgaste ocorrido no pino durante a realização dos ensaios.

## 5 Conclusões e trabalho futuro

Ao longo do presente estudo, foram estudados três aços no que respeita à dureza, à contagem de defeitos e ao desgaste dos mesmos sob ação de diferentes compostos, dois dos quais orgânicos e um outro orgânico com adição de vidro, sendo este o ponto principal do estudo. Com este estudo foi possível concluir que:

- Uma maior dureza do material não implica necessariamente uma maior resistência ao desgaste. O aço 2738 com uma dureza média de  $319,9^{+3,8}_{-2,3}$  HV 0,5 apresentou um desgaste superior, e em alguns casos próximo, ao desgaste observado para o aço ST52 com uma dureza média de  $154,2^{+4,2}_{-5,2}$  HV 0,5.
- Os ensaios realizados com as amostras sob ação do lixo com as partículas de vidro foram os que apresentaram uma maior perda de material (particularmente o aço R304), demonstrando a influência destas no desgaste. Se houvesse uma correta separação do lixo orgânico, o parafuso sem fim alcançaria uma vida útil bastante superior à atual;
- Em condições ideais, ou seja, se o lixo fosse unicamente orgânico, seria vantajoso o uso do aço R304 para a construção do parafuso sem fim. Este material foi o que sofreu menor desgaste sob ação dos lixos unicamente orgânicos e não apresentou sinais de corrosão.

Tendo em consideração todos os resultados obtidos, é proposta como trabalhos futuros:

- Estudo do efeito da corrosão aquando de paragens de funcionamento do parafuso sem fim. Ou seja, tendo em consideração as horas de serviço do parafuso sem fim, seria interessante avaliar com mais detalhe a corrosão. Esta avaliação poderia ser realizada submetendo as amostras ao desgaste e interrompendo o ensaio (realizando estes dois processos de forma intermitente), de modo a permitir o fenómeno de corrosão que possa ocorrer nos períodos de não utilização do parafuso sem fim.
- Análise de previsão de durabilidade. Tendo em consideração os resultados obtidos relativos à dureza, à contagem de defeitos e ao desgaste propõe-se um estudo matemático para previsão de vida útil de componentes sujeitos a desgaste e corrosão com o objetivo de se obter um modelo numérico de previsão de durabilidade do parafuso sem fim.

# Bibliografia

- [1] K.-H. Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier B.V., 1987.
- [2] F. Silva, *Tribologia, noções gerais*. Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
- [3] C. Rorres, “The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 126, n. 1, pp. 72–80, 2000.
- [4] J. H. F. Giles, J. J. R. Wagner, e E. M. Mount Iii, “Screw Design”, *Extrusion*, pp. 133–140, 2005.
- [5] O. B. Aluko, G. O. Oluwadare, I. A. Ola, e G. A. Makanjuola, “Rapid comparative wear evaluation of oilseed screw press maintenance materials in Nigeria”, *J. Food Eng.*, vol. 59, n. 2–3, pp. 111–116, 2003.
- [6] M. Ferrini, W. Borreani, G. Lomonaco, e F. Magugliani, “Design by theoretical and CFD analyses of a multi-blade screw pump evolving liquid lead for a Generation IV LFR”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 297, pp. 276–290, 2016.
- [7] G. W. Stachowiak, *Wear - Materials, mechanisms and practice*, vol. 53, n. 9. 2013.
- [8] E. Rabinowicz, *Friction And Wear Of Materials*. John Wiley and Sons, Inc., 1965.
- [9] B. Bhushan, *Introduction To Tribology*. John Wiley and Sons, Inc., 2013.
- [10] A. D. Sarkar, *Wear of Metals*. Elsevier, 1976.
- [11] X. Li, Y. Zhou, H. Cao, Y. Li, L. Wang, e S. Wang, “Wear Behavior and Mechanism of H13 Steel in Different Environmental Media”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 25, n. 10, pp. 4134–4144, 2016.
- [12] K. Hiratsuka e T. Yoshida, “The twin-ring tribometer-Characterizing sliding wear of metals excluding the effect of contact configurations”, *Wear*, vol. 270, n. 11–12, pp. 742–750, 2011.
- [13] ASTM Standard G99-95a (2000), *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. West Conshohocken, PA, 2000.
- [14] E. M. Bortoleto *et al.*, “Experimental and numerical analysis of dry contact in the pin on disc test”, *Wear*, vol. 301, n. 1–2, pp. 19–26, 2013.
- [15] F. E. Kennedy, Y. Lu, e I. Baker, “Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting”, *Tribol. Int.*, vol. 82, n. PB, pp. 534–542, 2015.
- [16] Y. Lyu, Y. Zhu, e U. Olofsson, “Wear between wheel and rail: A pin-on-disc study of

- environmental conditions and iron oxides”, *Wear*, vol. 328–329, pp. 277–285, 2015.
- [17] Ramada Aços, “ST52”. [Em linha]. Disponível em:  
[http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/st-52\\_.html](http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/st-52_.html).  
[Acedido: 15-Mar-2017].
- [18] Ramada Aços, “2738”. [Em linha]. Disponível em:  
<http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ligados/2738-.html>.  
[Acedido: 15-Mar-2017].
- [19] R. Aços, “R304”. [Em linha]. Disponível em: [http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-a-lveis-e-refracta-a-lrios/r-304\\_.html](http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-a-lveis-e-refracta-a-lrios/r-304_.html). [Acedido: 15-Mar-2017].
- [20] ASTM Standard E384-16, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. West Conshohocken, PA, 2016.
- [21] ASTM Standard E3-95, *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, PA, 1995.
- [22] ASTM Standard E407-07, *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. West Conshohocken, PA, 2007.
- [23] Vander Voort e W. Baldwin, *Metallography and Microstructures Handbook*, vol. 9. ASM International, 2004.

## **Anexos**



## A. Programa de LabView de determinação da força e coeficiente de atrito

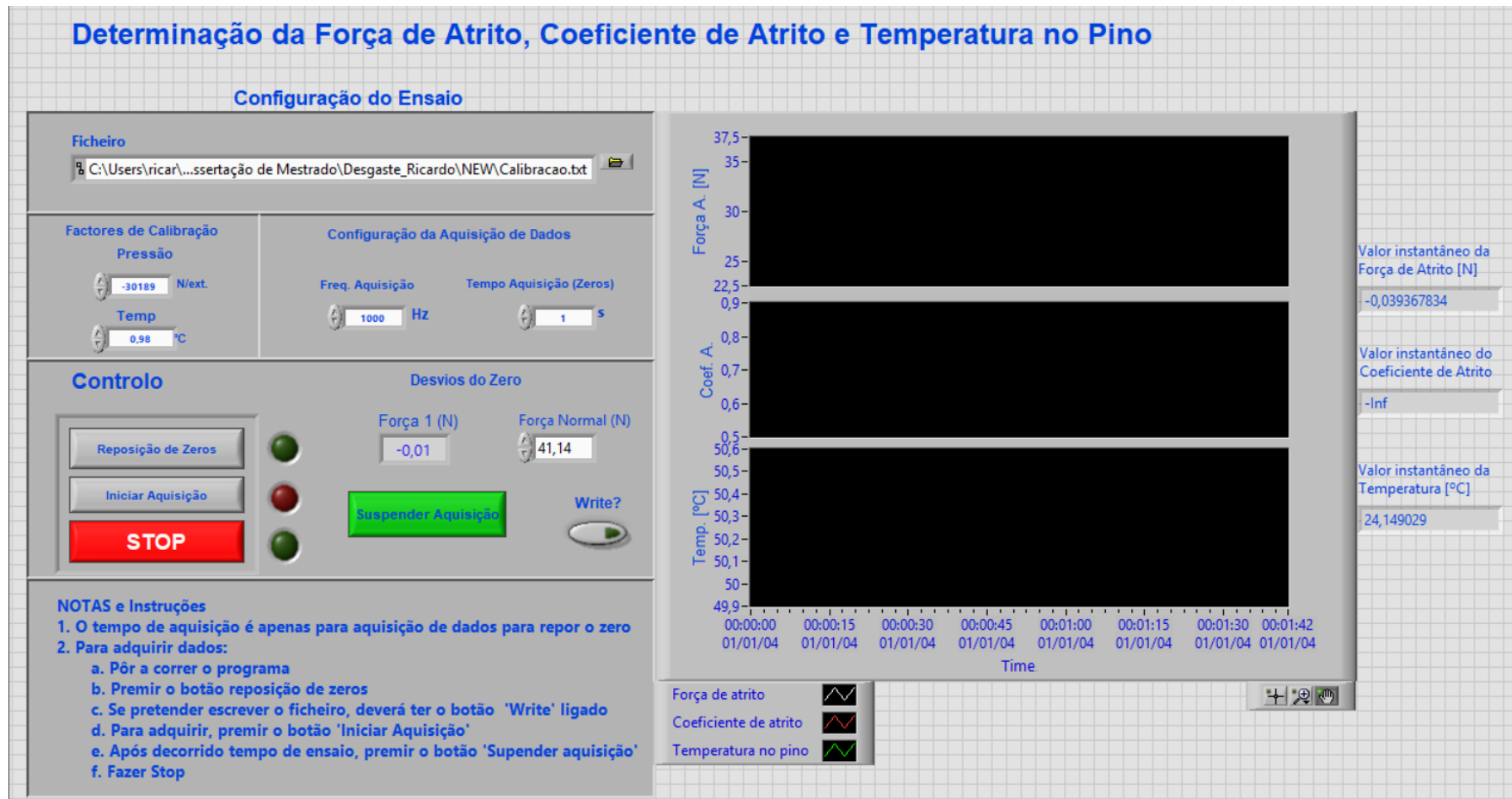


Figura A.1 – Painel frontal do programa do Labview para determinação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino.

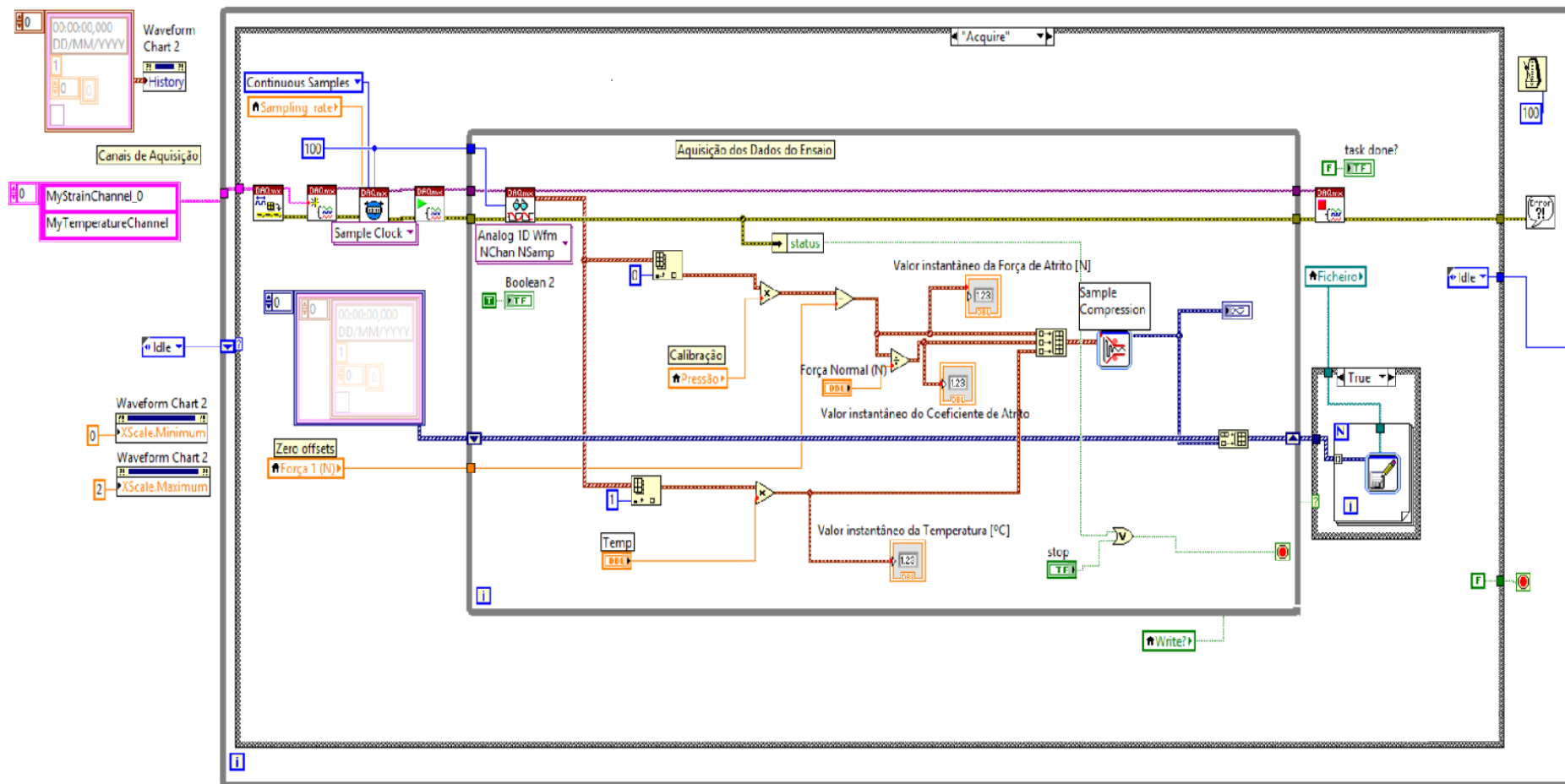


Figura A.2 – Diagrama de blocos do programa do Labview para determinação da força de atrito, coeficiente de atrito e temperatura no pino.

## B. Gráficos de probabilidade

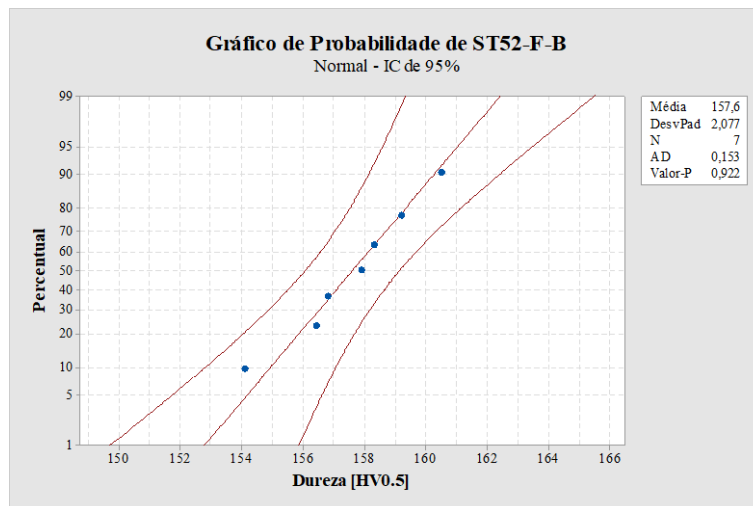


Figura B.1 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-B.

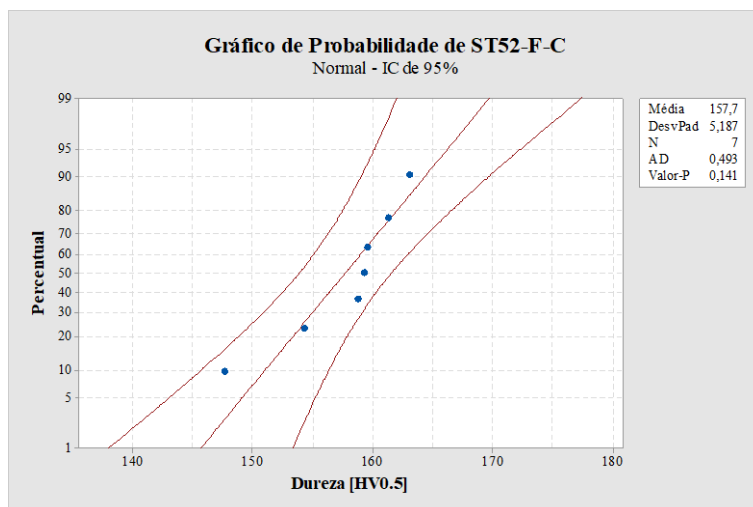


Figura B.2 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-F-C.

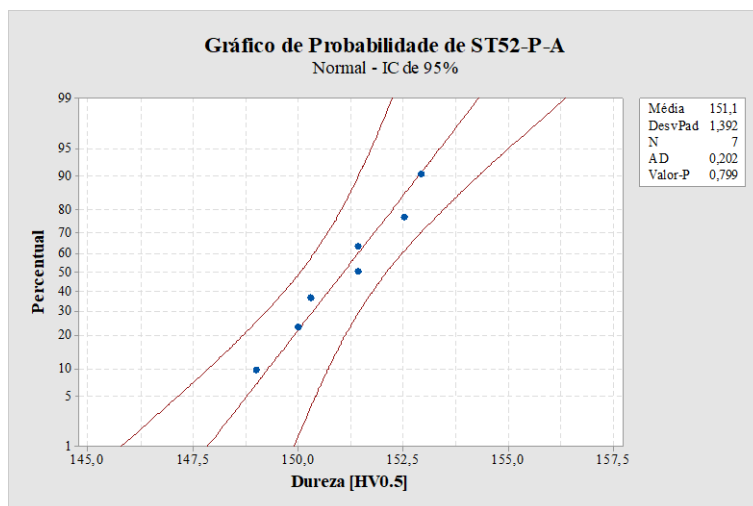


Figura B.3 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-A.

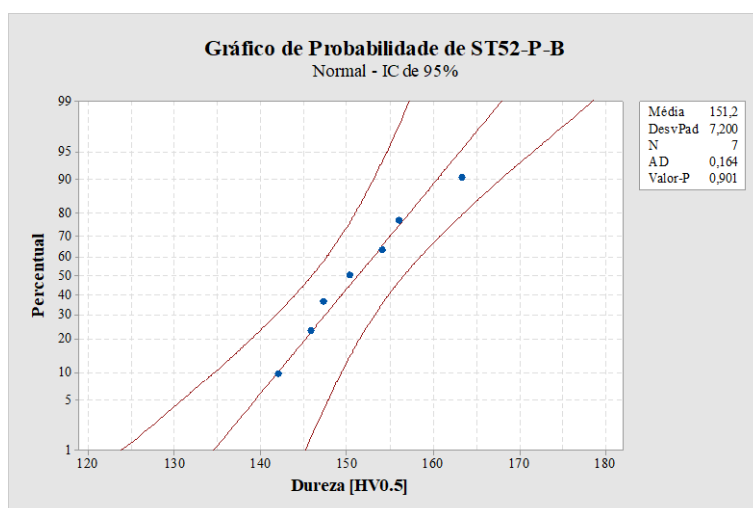


Figura B.4 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-B.

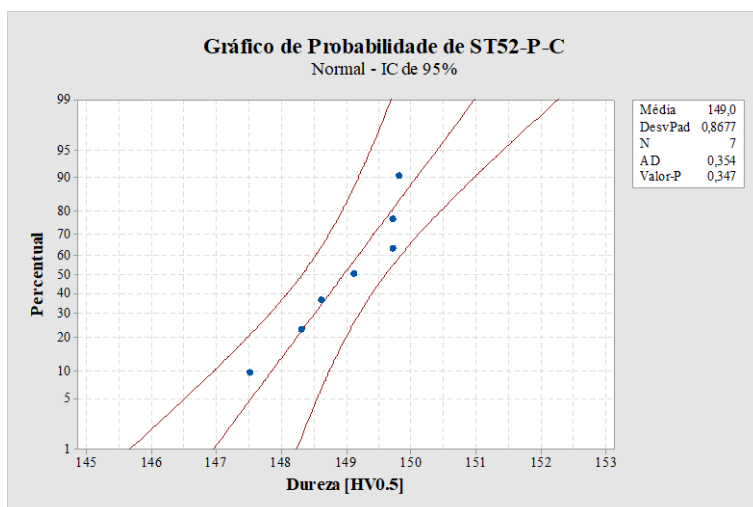


Figura B.5 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-P-C.

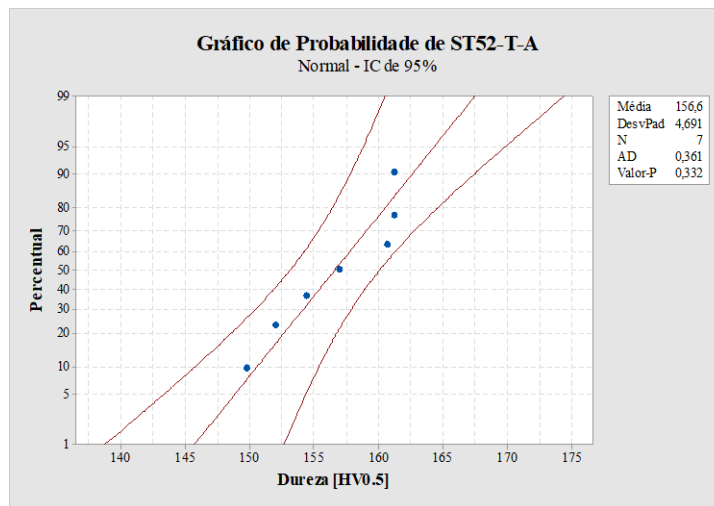


Figura B.6 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-A.

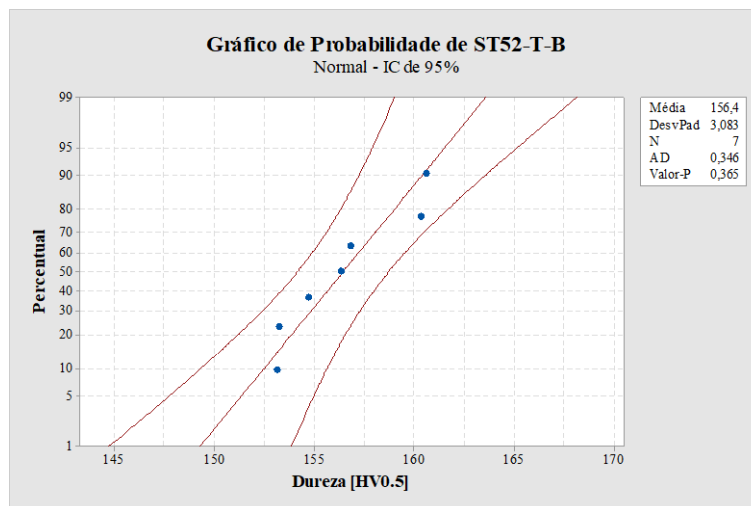


Figura B.7 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-B.

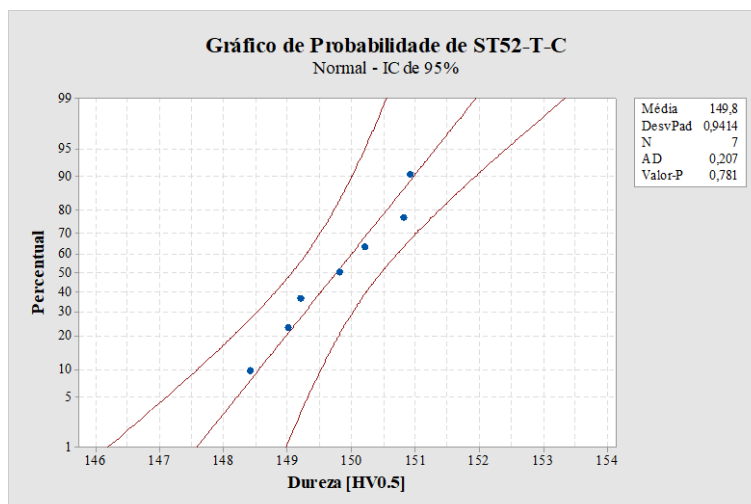


Figura B.8 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra ST52-T-C.

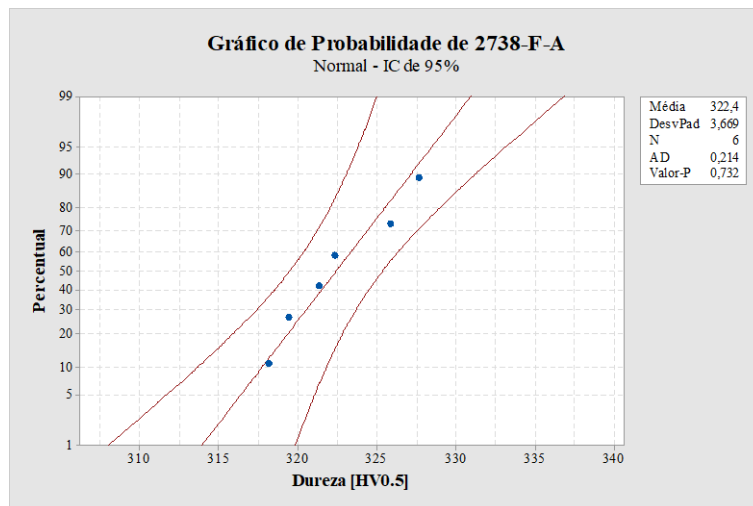


Figura B.9 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-A.

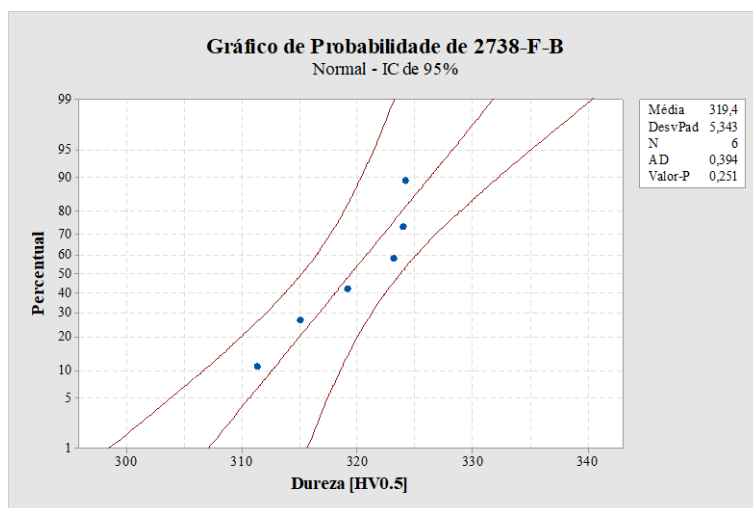


Figura B.10 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-B.

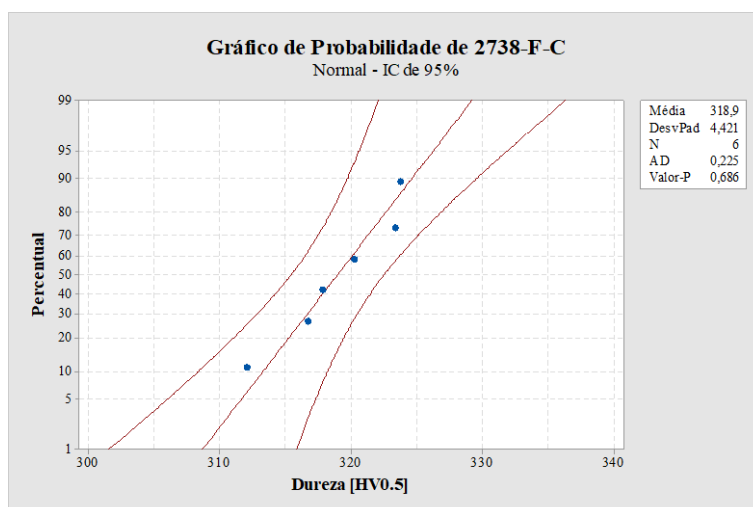


Figura B.11 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-F-C.

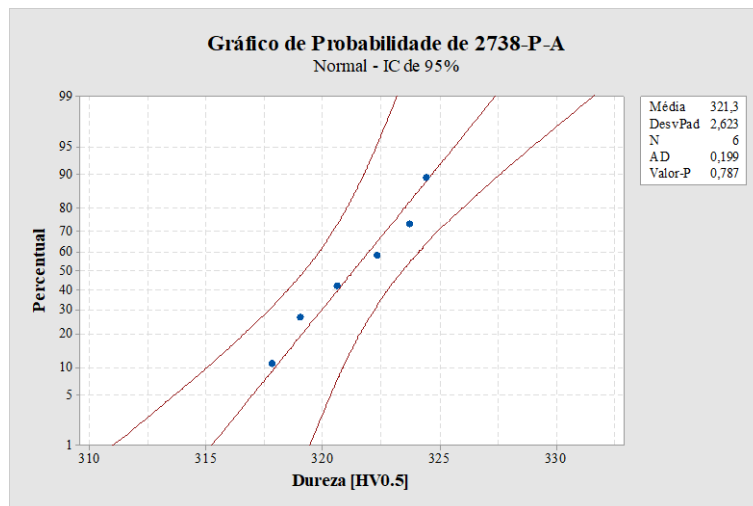


Figura B.12 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-A.

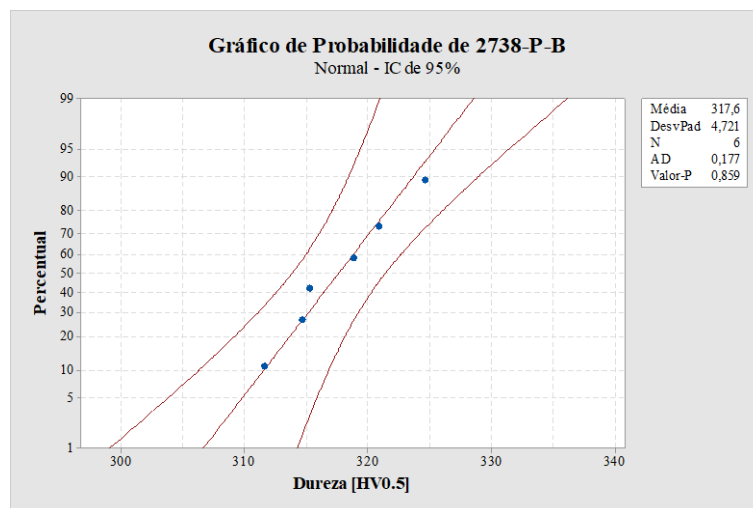


Figura B.13 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-B.

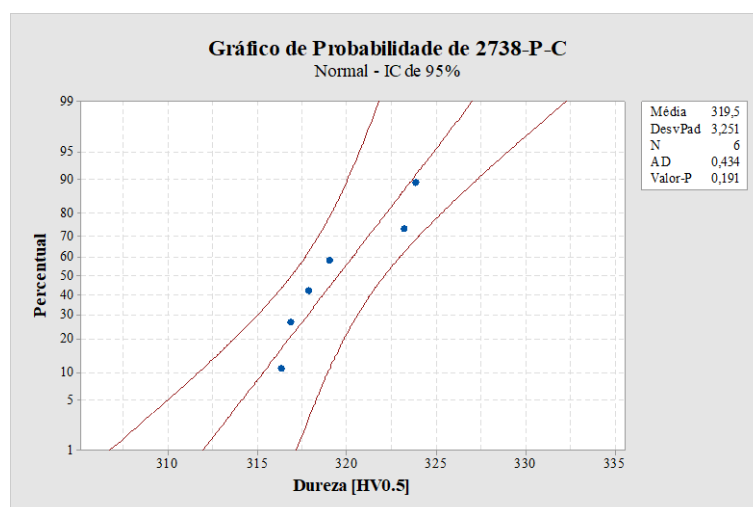


Figura B.14 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-P-C.

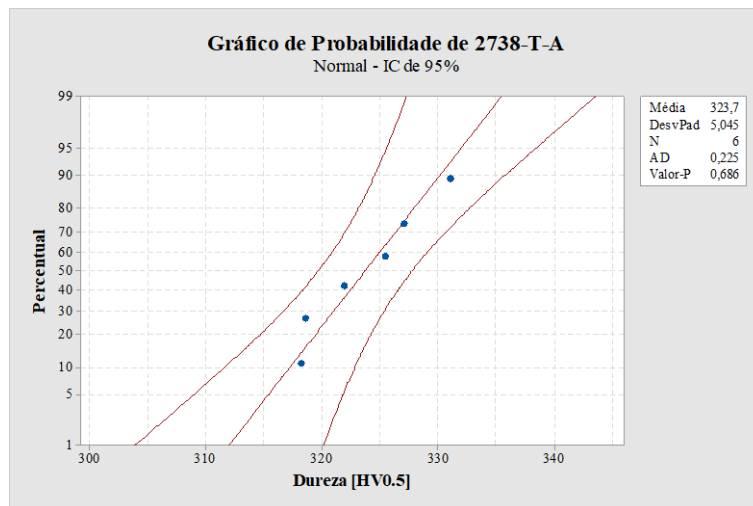


Figura B.15 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-A.

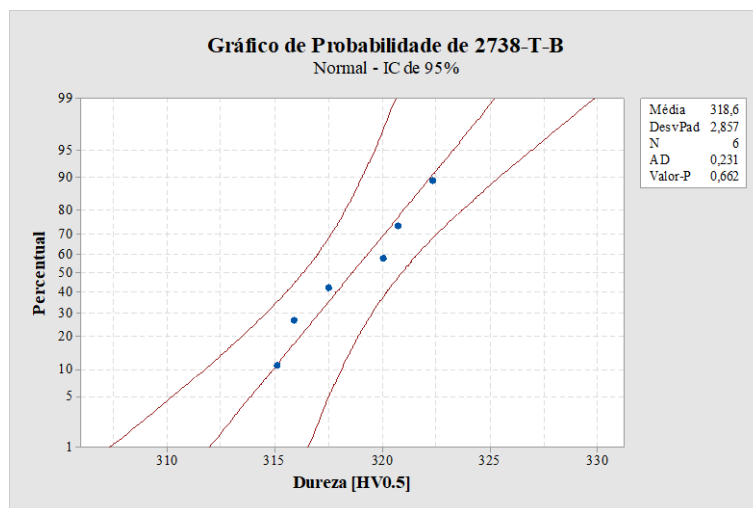


Figura B.16 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-B.

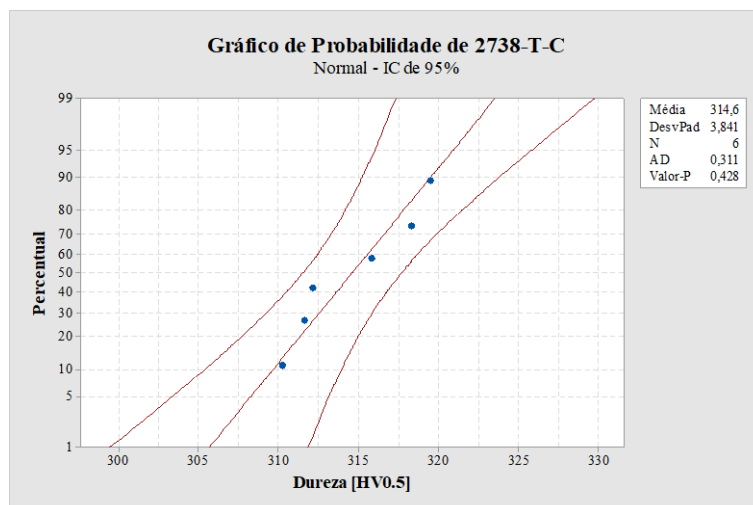


Figura B.17 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra 2738-T-C.



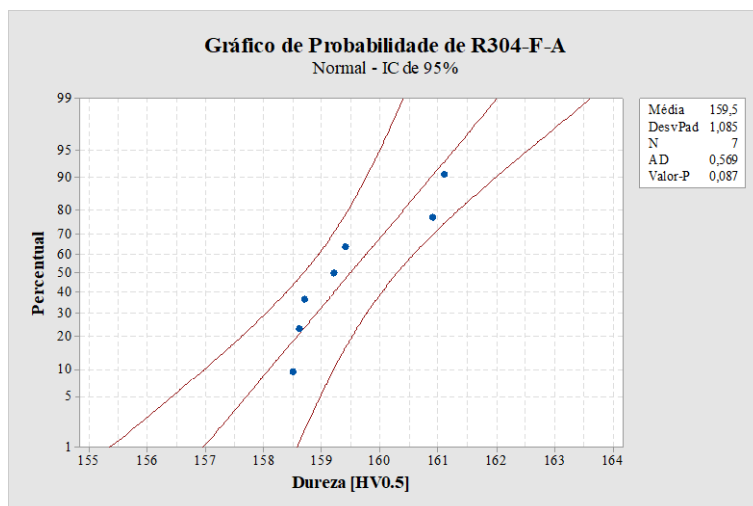


Figura B.18 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-A.

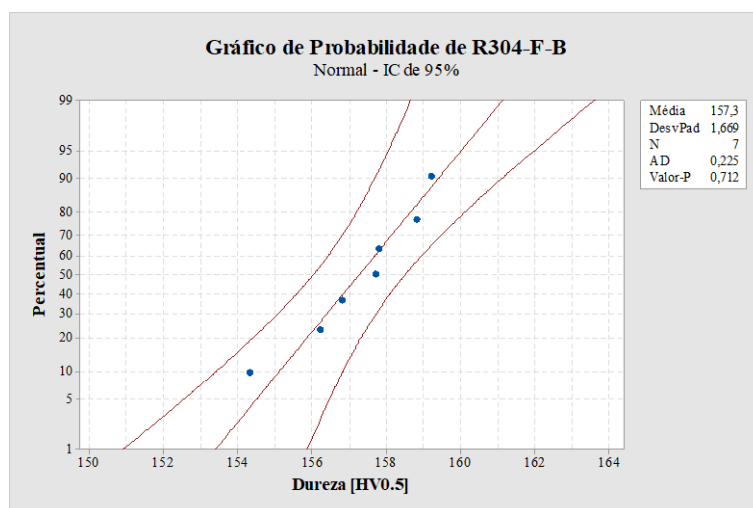


Figura B.19 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-B.

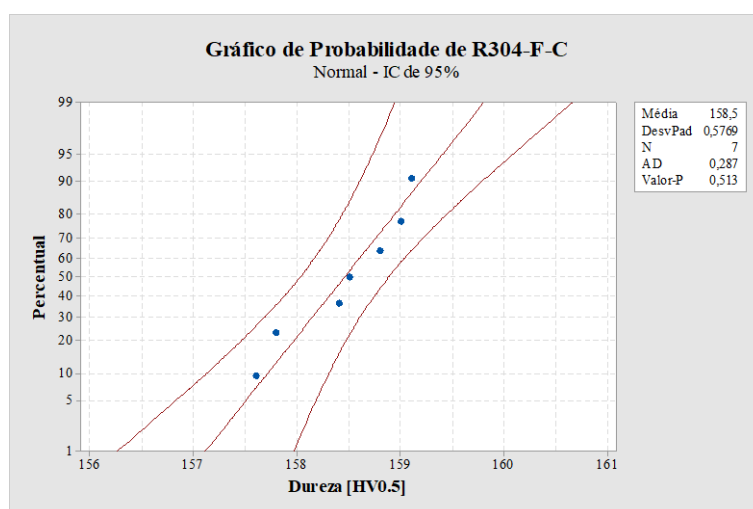


Figura B.20 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-F-C.

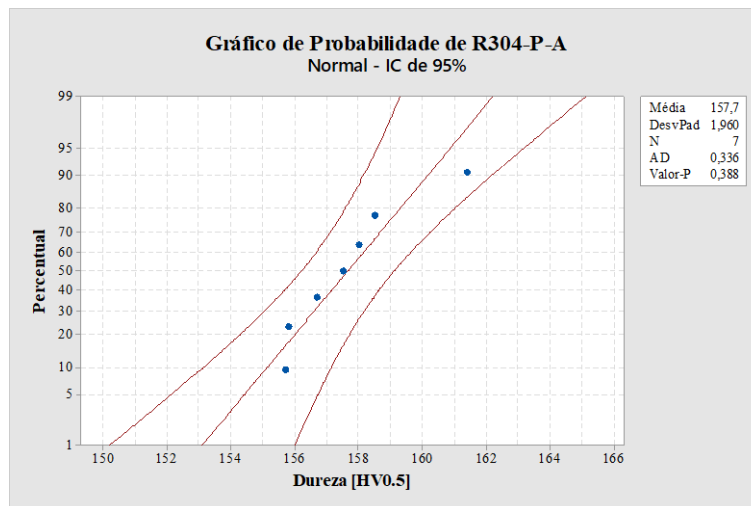


Figura B.21 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-A.

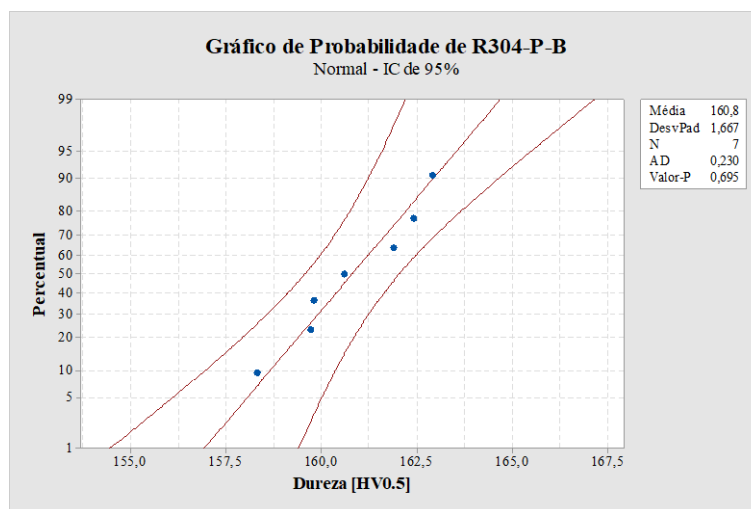


Figura B.22 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-B.

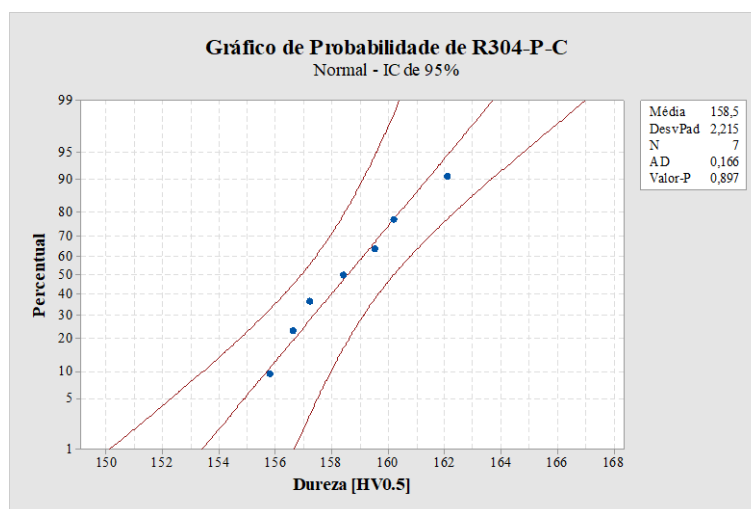


Figura B.23 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-P-C.

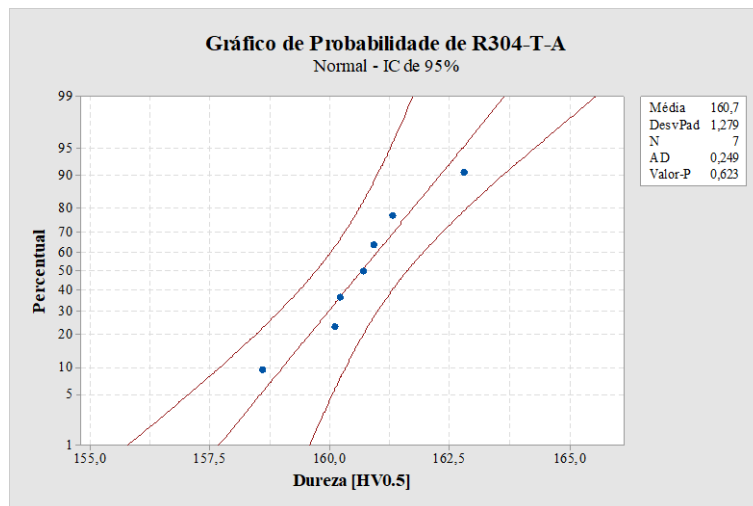


Figura B.24 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-A.

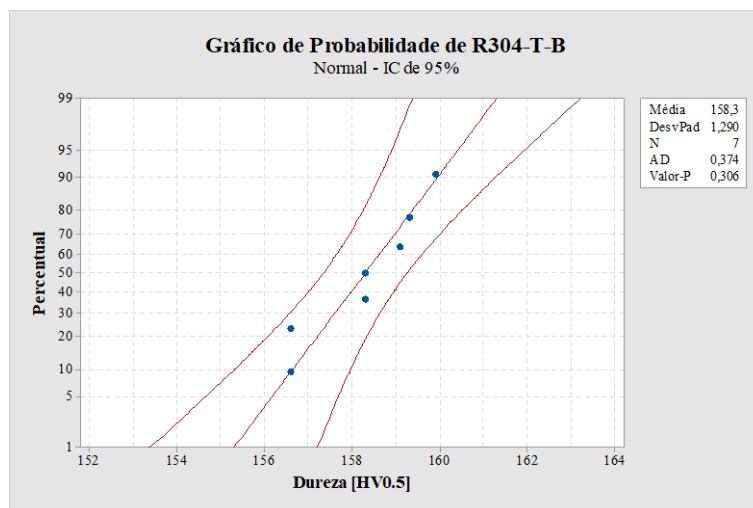


Figura B.25 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-B.

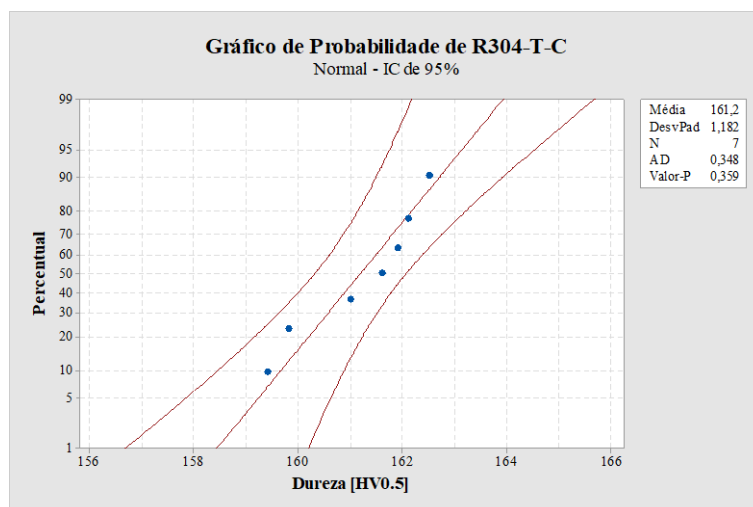


Figura B.26 – Gráfico de Probabilidade das indentações para a amostra R304-T-C.

## C. Tabelas dos dados referentes às durezas

Tabela C.1 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-B.

ST52-F-B					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	1,500	74,09	78,98	158,3
2	0,000	2,100	72,61	81,39	156,4
3	0,000	2,400	73,77	78,86	159,2
4	0,000	2,700	75,19	79,97	154,1
5	0,000	3,000	73,36	80,45	156,8
6	0,000	3,300	74,95	78,29	157,9
7	0,000	3,600	71,75	80,24	160,5
Dureza Vickers Média					157,6
Desvio Padrão					2,08
Intervalo de Confiança de 95%					1,54

Tabela C.2 – Indentações e durezas da amostra ST52-F-C.

ST52-F-C					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	72,41	78,42	163,0
2	0,000	4,100	74,52	78,06	159,3
3	0,000	4,400	76,04	79,01	154,3
4	0,000	4,700	77,80	80,74	147,6
5	0,000	5,300	73,56	78,92	159,5
6	0,000	5,600	74,98	77,89	158,7
7	0,000	6,200	73,72	77,92	161,3
Dureza Vickers Média					157,7
Desvio Padrão					5,19
Intervalo de Confiança de 95%					3,84

Tabela C.3 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-A.

ST52-P-A					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	77,17	78,56	152,9
2	0,000	4,400	77,48	79,75	150,0
3	0,000	4,700	77,73	78,20	152,5
4	0,000	5,000	77,16	79,94	150,3
5	0,000	5,600	77,30	79,23	151,4
6	0,000	6,100	77,36	79,15	151,4
7	0,000	6,400	78,41	79,34	149,0
Dureza Vickers Média					151,1
Desvio Padrão					1,39
Intervalo de Confiança de 95%					1,03

Tabela C.4 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-B.

ST52-P-B					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,700	76,15	78,03	156,0
2	0,000	4,000	77,09	78,10	154,0
3	0,000	4,900	79,80	81,89	141,9
4	0,000	5,500	77,81	80,95	147,2
5	0,000	5,800	78,68	80,89	145,7
6	0,000	6,100	78,01	79,14	150,2
7	0,000	6,400	73,86	76,83	163,3
Dureza Vickers Média					151,2
Desvio Padrão					7,20
Intervalo de Confiança de 95%					5,33

Tabela C.5 – Indentações e durezas da amostra ST52-P-C.

ST52-P-C					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,600	77,89	80,25	148,3
2	0,000	3,900	77,20	80,20	149,7
3	0,000	4,200	77,56	79,81	149,8
4	0,000	4,800	79,27	78,73	148,6
5	0,000	5,100	79,47	79,08	147,5
6	0,000	5,400	76,95	80,74	149,1
7	0,000	5,700	76,88	80,55	149,7
Dureza Vickers Média					149,0
Desvio Padrão					0,87
Intervalo de Confiança de 95%					0,64

Tabela C.7 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-B.

ST52-T-B					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,000	75,42	76,69	160,3
2	0,000	3,600	76,56	77,25	156,8
3	0,000	3,900	76,55	79,04	153,2
4	0,000	4,200	77,13	77,72	154,7
5	0,000	4,500	76,10	77,94	156,3
6	0,000	5,100	76,64	75,33	160,6
7	0,000	5,400	77,71	77,91	153,1
Dureza Vickers Média					156,4
Desvio Padrão					3,08
Intervalo de Confiança de 95%					2,28

Tabela C.9 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-A.

2738-F-A					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	2,000	53,26	53,44	325,8
2	0,000	2,300	52,59	53,82	327,6
3	0,000	2,600	54,22	53,06	322,3
4	0,000	2,900	53,45	54,00	321,3
5	0,000	3,800	53,16	54,81	318,1
6	0,000	4,700	53,83	53,93	319,4
Dureza Vickers Média					322,4
Desvio Padrão					3,67
Intervalo de Confiança de 95%					2,94

Tabela C.6 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-A.

ST52-T-A					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	2,000	75,82	76,14	160,6
2	0,000	2,900	75,84	77,91	156,9
3	0,000	3,200	78,08	78,09	152,0
4	0,000	3,500	78,68	78,71	149,7
5	0,000	3,800	75,08	76,62	161,2
6	0,000	4,100	75,44	76,26	161,2
7	0,000	4,700	76,90	78,12	154,4
Dureza Vickers Média					156,6
Desvio Padrão					4,69
Intervalo de Confiança de 95%					3,47

Tabela C.8 – Indentações e durezas da amostra ST52-T-C.

ST52-T-C					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	2,500	78,69	79,09	149,0
2	0,000	2,800	78,25	79,08	149,8
3	0,000	3,400	78,39	78,44	150,8
4	0,000	3,700	78,95	79,17	148,4
5	0,000	4,000	78,66	78,12	150,9
6	0,000	4,600	77,56	80,13	149,2
7	0,000	4,900	77,08	80,06	150,2
Dureza Vickers Média					149,8
Desvio Padrão					0,94
Intervalo de Confiança de 95%					0,70

Tabela C.10 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-B.

2738-F-B					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	53,31	53,70	323,9
2	0,000	4,100	54,70	54,47	311,2
3	0,000	5,600	53,84	53,97	319,1
4	0,000	5,900	53,66	53,31	324,1
5	0,000	6,200	53,55	53,60	323,1
6	0,000	6,500	54,76	53,75	315,0
Dureza Vickers Média					319,4
Desvio Padrão					5,34
Intervalo de Confiança de 95%					4,27

Tabela C.11 – Indentações e durezas da amostra 2738-F-C.

<b>2738-F-C</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,500	52,93	54,12	323,7
2	0,000	4,100	53,00	54,11	323,3
3	0,000	4,700	53,53	54,69	316,7
4	0,000	5,600	53,53	54,50	317,8
5	0,000	5,900	53,72	55,30	312,0
6	0,000	6,200	53,48	54,13	320,2
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>319,0</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>4,42</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>3,54</b>

Tabela C.13 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-B.

<b>2738-P-B</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	4,200	54,69	53,78	315,2
2	0,000	4,500	53,33	53,56	324,6
3	0,000	4,800	53,38	54,47	318,8
4	0,000	5,400	55,09	54,02	311,6
5	0,000	5,700	54,48	54,09	314,6
6	0,000	6,000	53,88	53,65	320,8
7	0,000	4,200	54,69	53,78	315,2
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>317,6</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>4,72</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>3,78</b>

Tabela C.15 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-A.

<b>2738-T-A</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,600	53,52	53,81	321,9
2	0,000	3,900	54,72	53,24	318,2
3	0,000	4,200	53,15	53,34	327,1
4	0,000	4,800	53,55	54,34	318,6
5	0,000	5,400	52,54	53,31	331,0
6	0,000	5,700	52,04	54,72	325,4
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>323,7</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>5,04</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>4,04</b>

Tabela C.12 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-A.

<b>2738-P-A</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	54,09	53,73	319,0
2	0,000	4,700	53,13	53,91	323,7
3	0,000	5,300	53,58	53,34	324,4
4	0,000	5,600	53,87	53,41	322,3
5	0,000	5,900	53,94	53,62	320,6
6	0,000	6,200	54,15	53,88	317,8
7	0,000	3,800	54,09	53,73	319,0
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>321,3</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>2,62</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>2,10</b>

Tabela C.14 – Indentações e durezas da amostra 2738-P-C.

<b>2738-P-C</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	54,13	53,70	319,0
2	0,000	4,400	54,16	54,05	316,8
3	0,000	5,000	53,62	53,50	323,2
4	0,000	5,300	54,20	53,83	317,8
5	0,000	5,600	54,89	53,39	316,3
6	0,000	5,900	53,66	53,38	323,8
7	0,000	3,800	54,13	53,70	319,0
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>319,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>3,25</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>2,60</b>

Tabela C.16 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-B.

<b>2738-T-B</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	5,800	53,68	53,59	322,3
2	0,000	6,100	54,55	53,80	315,9
3	0,000	6,300	53,10	55,40	315,1
4	0,000	7,600	54,47	53,61	317,5
5	0,000	7,900	53,84	53,81	320,0
6	0,000	8,500	54,11	53,43	320,7
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>318,6</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>2,86</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>2,29</b>

Tabela C.17 – Indentações e durezas da amostra 2738-T-C.

<b>2738-T-C</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	5,800	53,51	55,59	311,6
2	0,000	6,700	54,21	53,26	321,1
3	0,000	7,300	54,09	54,29	315,8
4	0,000	7,600	53,59	54,36	318,3
5	0,000	7,900	54,12	53,63	319,5
6	0,000	8,500	54,80	54,55	310,2
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>317,3</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>3,71</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>2,97</b>

Tabela C.19 – Indentações e durezas da amostra R304-F-B.

<b>R304-F-B</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	76,81	76,97	156,8
2	0,000	4,100	76,03	77,25	157,8
3	0,000	4,399	75,59	77,03	159,2
4	0,000	5,000	76,18	76,65	158,8
5	0,000	5,600	77,06	77,03	156,2
6	0,000	5,900	76,39	76,97	157,7
7	0,000	6,200	77,11	77,91	154,3
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>157,3</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,67</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>1,24</b>

Tabela C.21 – Indentações e durezas da amostra R304-P-A.

<b>R304-P-A</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	76,31	77,52	156,7
2	0,000	4,400	75,79	75,80	161,4
3	0,000	4,700	77,17	77,10	155,8
4	0,000	5,000	76,58	77,75	155,7
5	0,000	5,300	76,67	76,31	158,5
6	0,000	5,900	76,98	76,46	157,5
7	0,000	6,500	76,17	77,02	158,0
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>157,7</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,96</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>1,45</b>

Tabela C.18 – Indentações e durezas da amostra R304-F-A.

<b>R304-F-A</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	74,90	78,01	158,6
2	0,000	4,100	75,48	76,25	161,1
3	0,000	4,700	76,39	76,59	158,5
4	0,000	5,000	76,99	75,89	158,7
5	0,000	5,300	76,04	75,77	160,9
6	0,000	5,900	76,87	75,78	159,2
7	0,000	6,500	75,81	76,73	159,4
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>159,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,09</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>0,80</b>

Tabela C.20 – Indentações e durezas da amostra R304-F-C.

<b>R304-F-C</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	4,100	76,78	76,22	158,4
2	0,000	5,000	76,17	76,66	158,8
3	0,000	5,600	75,92	76,83	159,0
4	0,000	5,900	76,98	76,31	157,8
5	0,000	6,200	75,91	77,52	157,6
6	0,000	6,500	76,91	76,06	158,5
7	0,000	6,800	75,73	76,92	159,1
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>158,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>0,58</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>0,43</b>

Tabela C.22 – Indentações e durezas da amostra R304-P-B.

<b>R304-P-B</b>					
N	X [mm]	Y [mm]	D1 [μm]	D2 [μm]	HV
1	0,000	3,800	76,13	76,95	158,3
2	0,000	4,100	76,16	74,73	162,9
3	0,000	4,400	76,03	76,34	159,7
4	0,000	4,700	75,24	76,09	161,9
5	0,000	5,000	75,45	75,67	162,4
6	0,000	5,600	75,49	76,48	160,6
7	0,000	6,200	75,68	76,65	159,8
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>160,8</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,67</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>1,24</b>

Tabela C.23 – Indentações e durezas da amostra R304-P-C.

<b>R304-P-C</b>					
<b>N</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>D1 [μm]</b>	<b>D2 [μm]</b>	<b>HV</b>
<b>1</b>	0,000	3,800	77,25	76,67	156,6
<b>2</b>	0,000	4,100	75,74	76,43	160,2
<b>3</b>	0,000	4,400	76,32	74,95	162,1
<b>4</b>	0,000	4,700	76,97	77,31	155,8
<b>5</b>	0,000	5,300	76,48	77,14	157,2
<b>6</b>	0,000	5,600	75,75	76,73	159,5
<b>7</b>	0,000	6,500	76,38	76,57	158,5
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>158,6</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>2,21</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>1,64</b>

Tabela C.25 – Indentações e durezas da amostra R304-T-B.

<b>R304-T-B</b>					
<b>N</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>D1 [μm]</b>	<b>D2 [μm]</b>	<b>HV</b>
<b>1</b>	0,000	6,100	76,15	76,54	159,1
<b>2</b>	0,000	6,400	76,75	77,11	156,6
<b>3</b>	0,000	6,700	76,67	76,40	158,3
<b>4</b>	0,000	7,000	76,03	77,05	158,3
<b>5</b>	0,000	7,300	76,23	76,38	159,3
<b>6</b>	0,000	7,900	76,52	75,77	159,9
<b>7</b>	0,000	8,200	76,64	77,26	156,6
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>158,3</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,29</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>0,96</b>

Tabela C.24 – Indentações e durezas da amostra R304-T-A.

<b>R304-T-A</b>					
<b>N</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>D1 [μm]</b>	<b>D2 [μm]</b>	<b>HV</b>
<b>1</b>	0,000	5,800	75,72	77,22	158,6
<b>2</b>	0,000	6,400	75,17	76,68	160,9
<b>3</b>	0,000	6,700	76,00	76,20	160,1
<b>4</b>	0,000	7,000	76,23	74,70	162,8
<b>5</b>	0,000	7,300	75,87	76,07	160,7
<b>6</b>	0,000	7,600	75,53	76,09	161,3
<b>7</b>	0,000	8,500	76,09	76,06	160,2
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>160,7</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,28</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>0,95</b>

Tabela C.26 – Indentações e durezas da amostra R304-T-C.

<b>R304-T-C</b>					
<b>N</b>	<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>D1 [μm]</b>	<b>D2 [μm]</b>	<b>HV</b>
<b>1</b>	0,000	6,300	76,03	76,50	159,4
<b>2</b>	0,000	6,600	75,53	75,96	161,6
<b>3</b>	0,000	6,900	75,54	76,23	161,0
<b>4</b>	0,000	7,200	74,68	76,69	161,9
<b>5</b>	0,000	7,800	75,80	75,27	162,5
<b>6</b>	0,000	8,100	75,94	76,42	159,8
<b>7</b>	0,000	8,700	75,23	76,04	162,1
<b>Dureza Vickers Média</b>					<b>161,2</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,18</b>
<b>Intervalo de Confiança de 95%</b>					<b>0,88</b>



## D. Sub-rotina Matlab

```
sizeA=size(A);
```

```
a=(sizeA(1,1)/10);
```

```
b=floor(a);
```

```
B=zeros(b,3);
```

```
j=0;
```

```
for i=1:b
```

```
    for c=1:10
```

```
        j=j+1;
```

```
        B(i,1)=B(i,1)+A(j,2);
```

```
    end
```

```
    B(i,1)=(B(i,1)/10);
```

```
end
```

```
j=0;
```

```
for i=1:b
```

```
    for c=1:10
```

```
        j=j+1;
```

```
        B(i,2)=B(i,2)+A(j,3);
```

```
    end
```

```
    B(i,2)=(B(i,2)/10);
```

```
end
```

```

j=0;

for i=1:b

    for c=1:10

        j=j+1;

        B(i,3)=B(i,3)+A(j,4);

    end

    B(i,3)=(B(i,3)/10);

end

sizeB=size(B);

B(:,4)=B(:,3);

B(:,3)=B(:,2);

B(:,2)=B(:,1);

t=0;

for i=1:sizeB(1,1)

    B(i,1)=t;

    t=t+1;

end

save('media','B')

xlswrite('Ensaio.xlsx',B)

```

## E. Resultados dos ensaios de desgaste

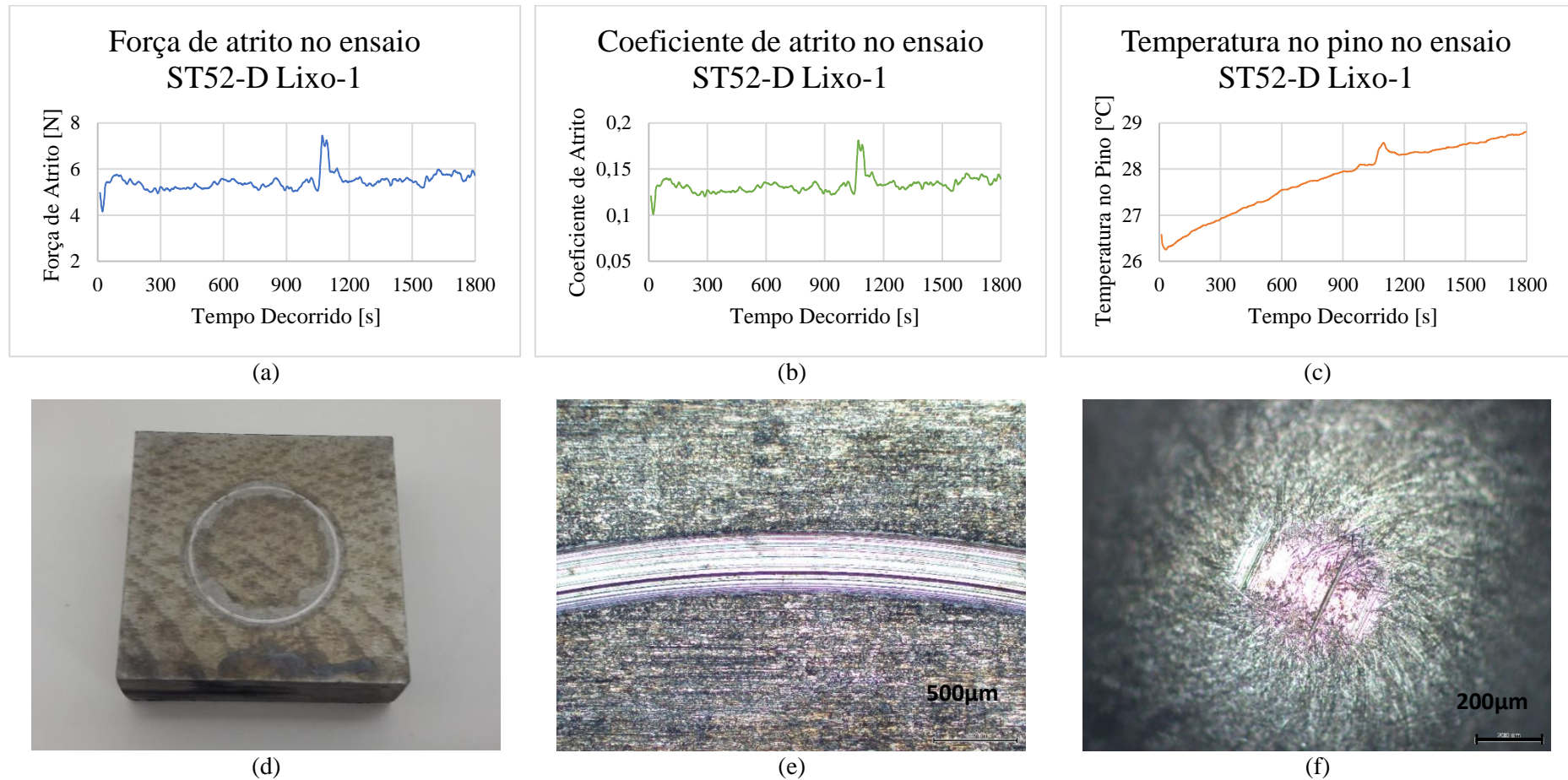
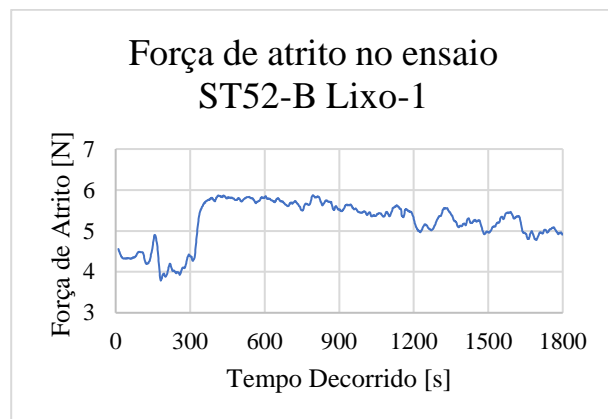
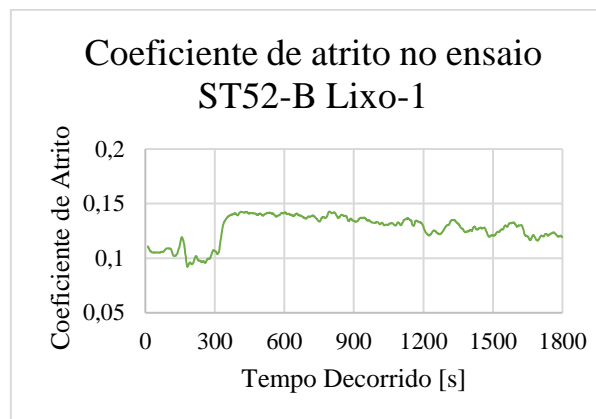


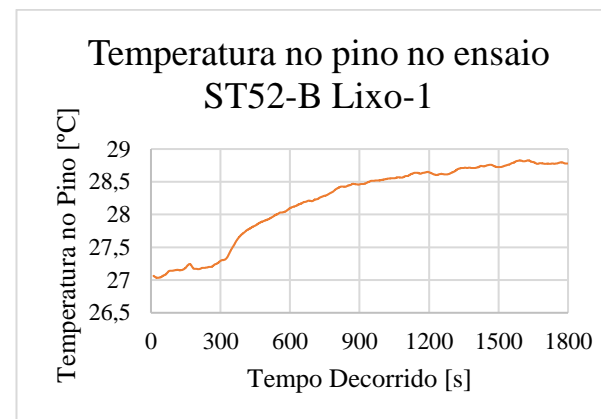
Figura E.1 – Resultados do ensaio ST52-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



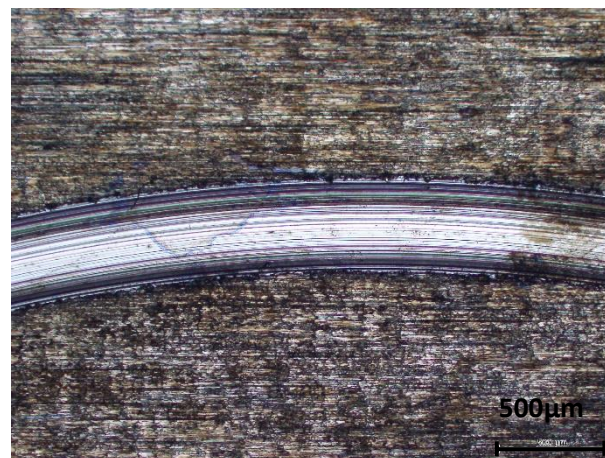
(b)



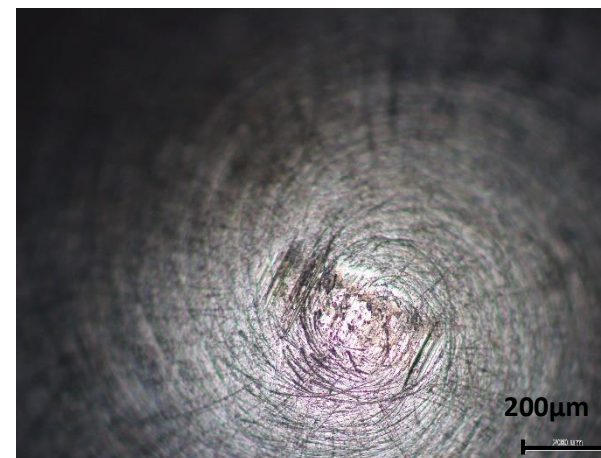
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.2 – Resultados do ensaio ST52-R Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

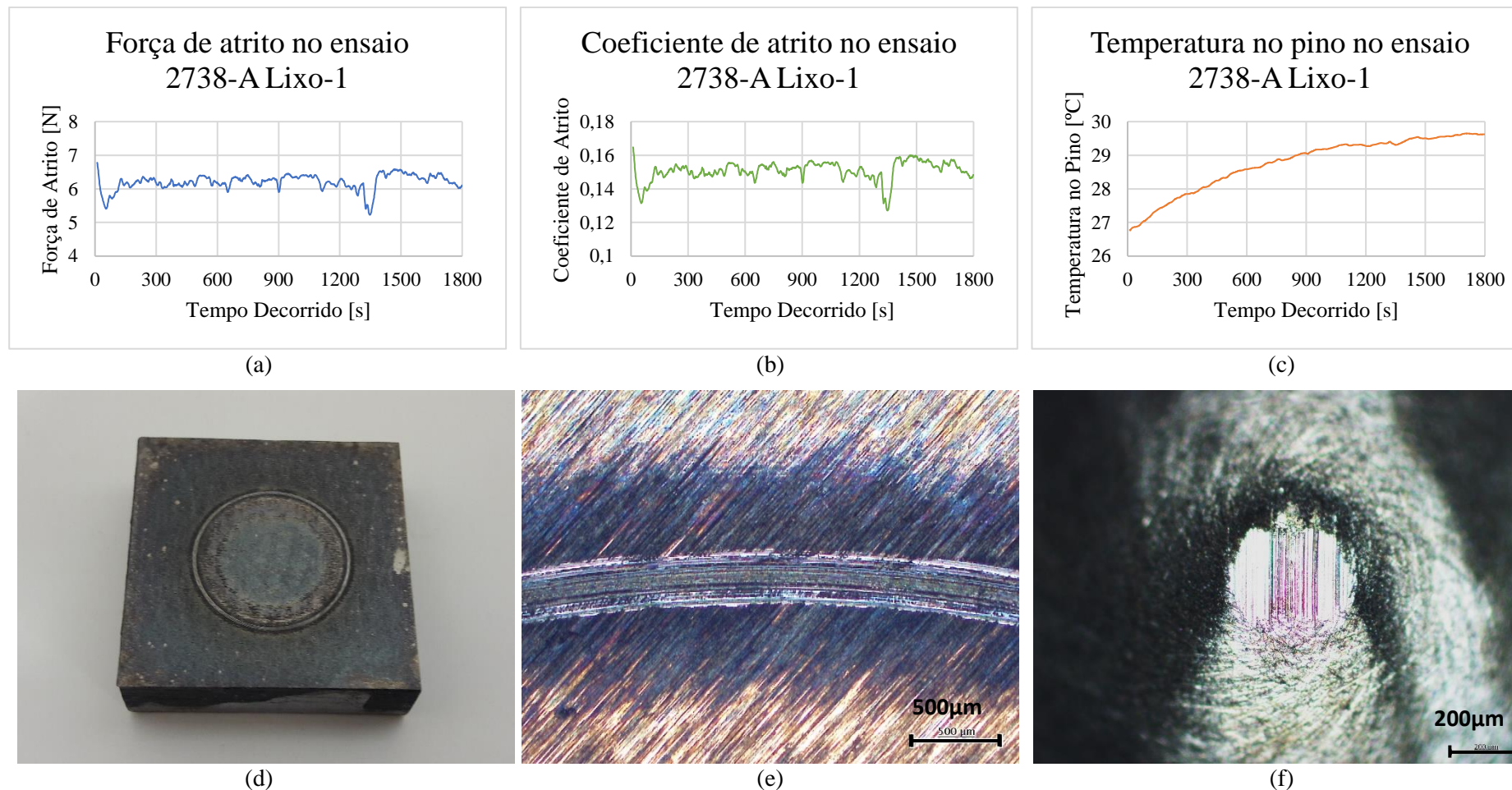


Figura E.3 – Resultados do ensaio 2738-A Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



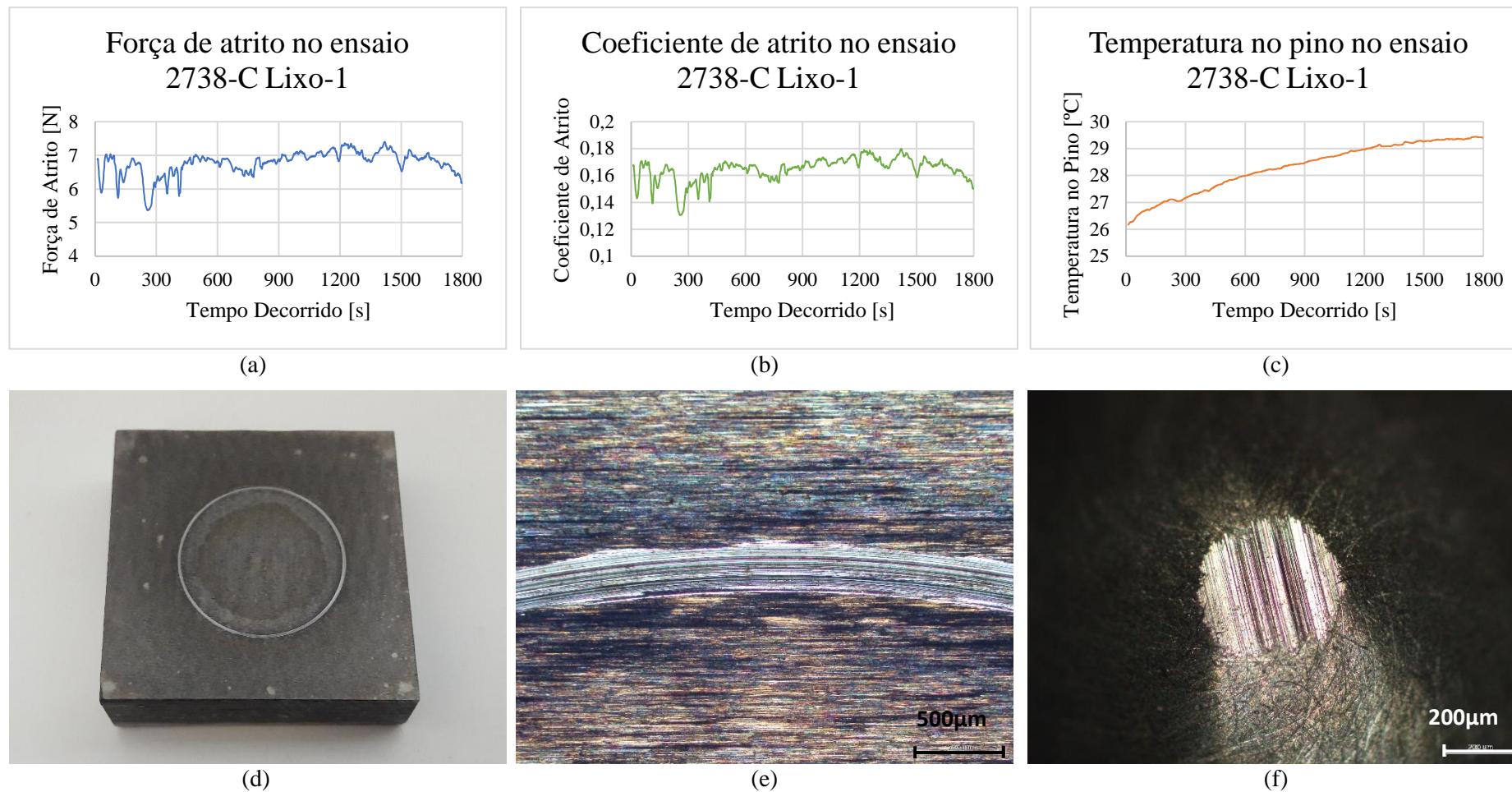


Figura E.4 – Resultados do ensaio 2738-C Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

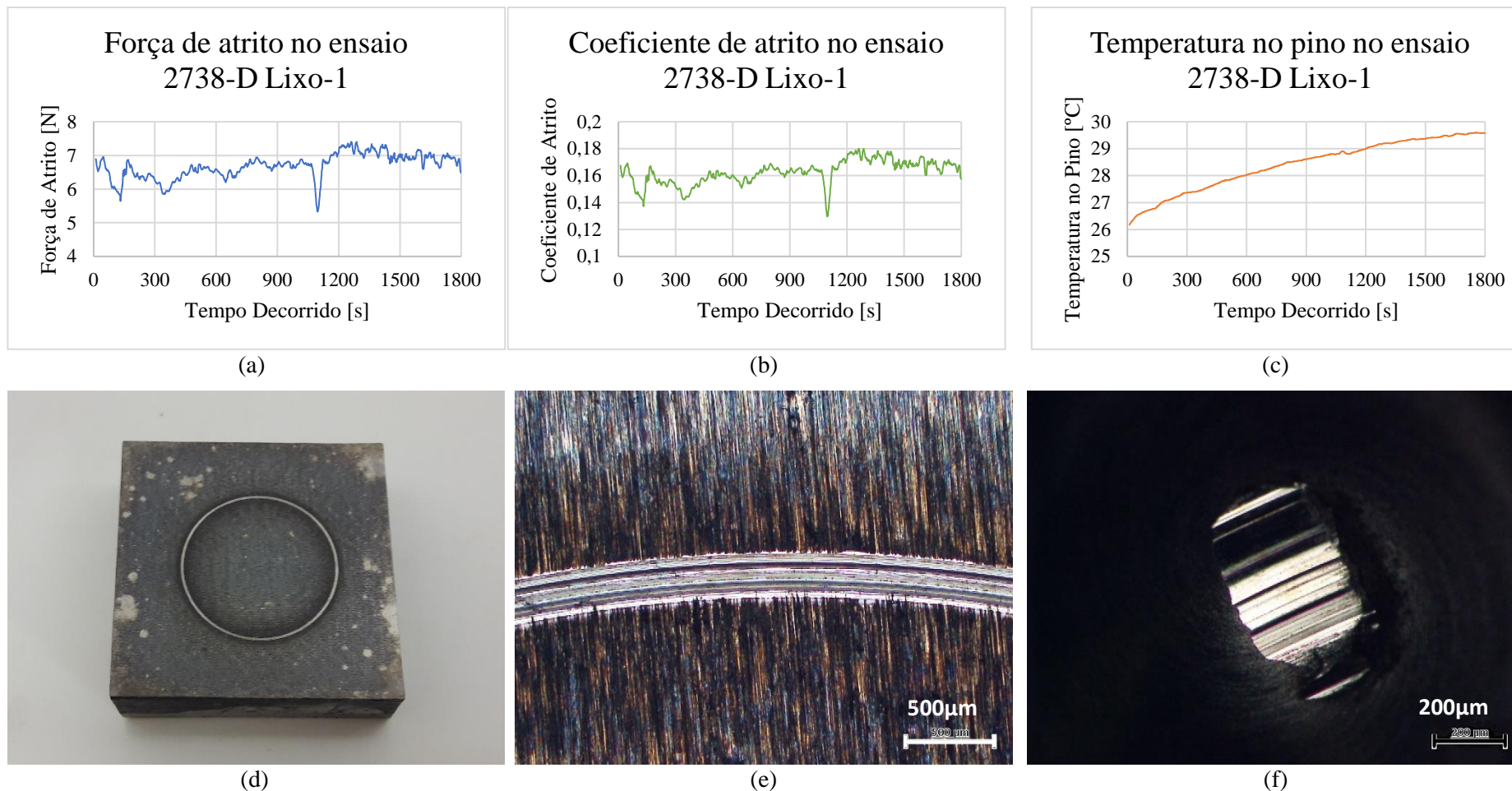


Figura E.5 – Resultados do ensaio 2738-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

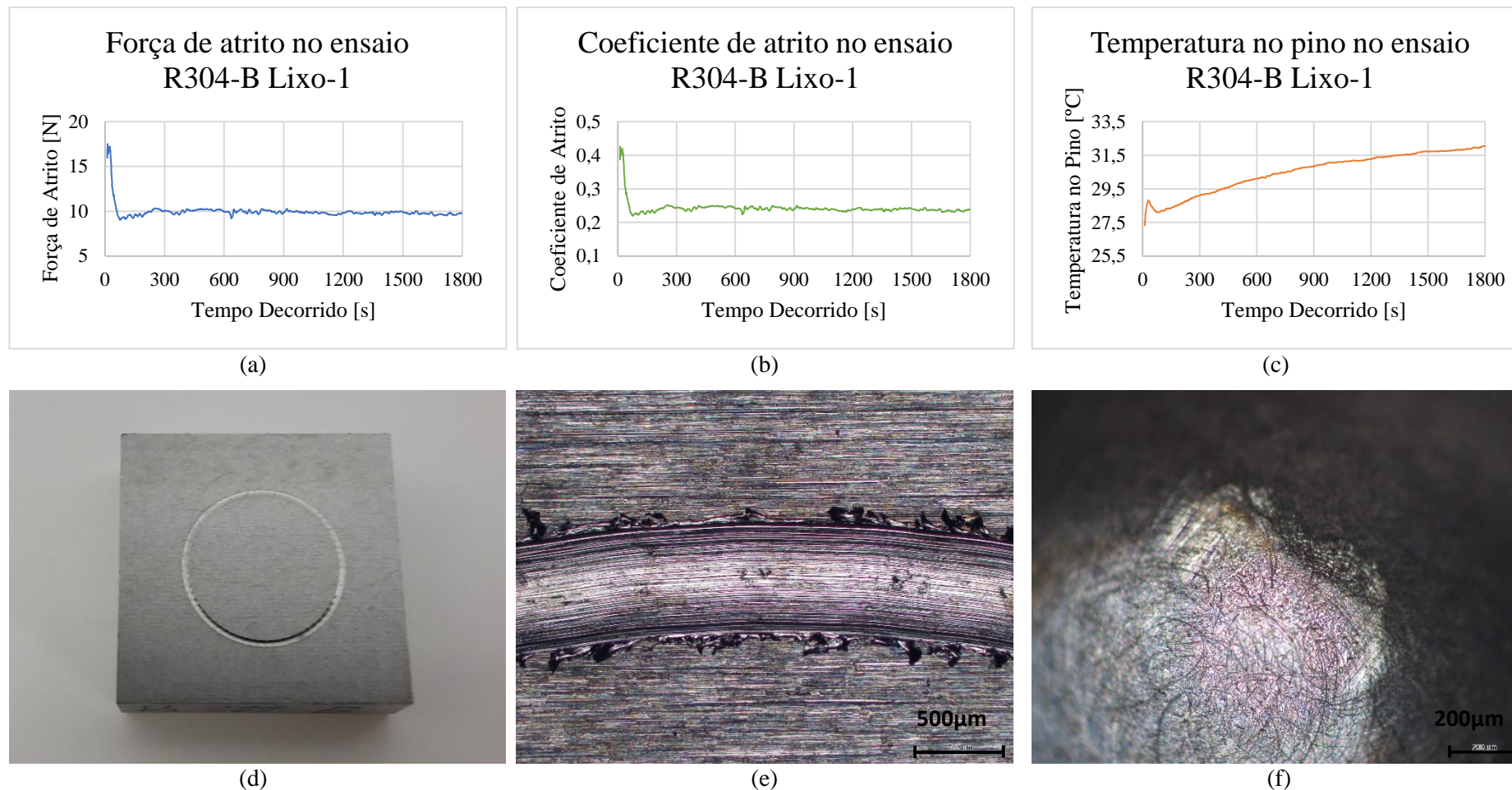


Figura E.6 – Resultados do ensaio R304-B Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



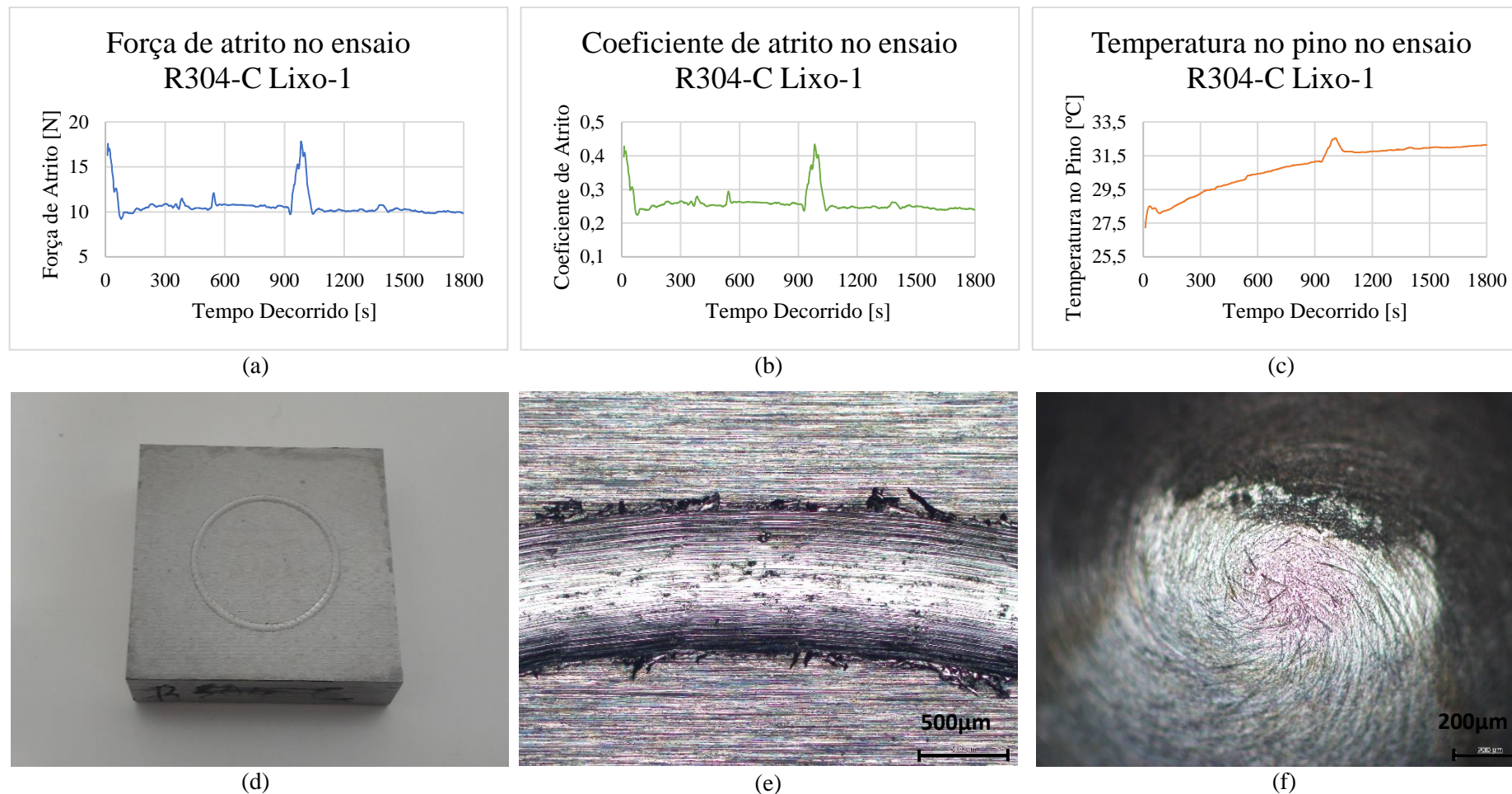


Figura E.7 – Resultados do ensaio R304-C Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

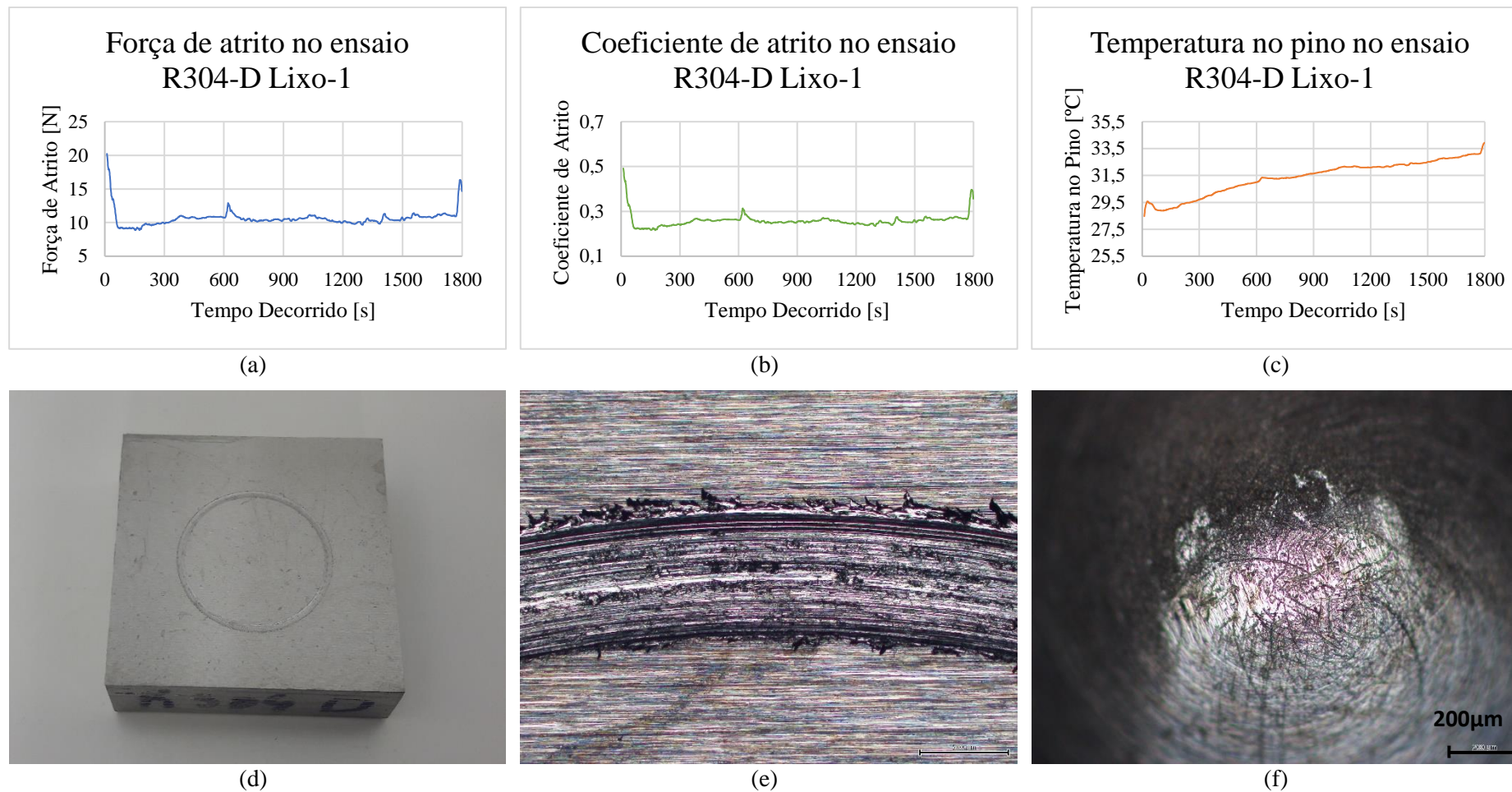
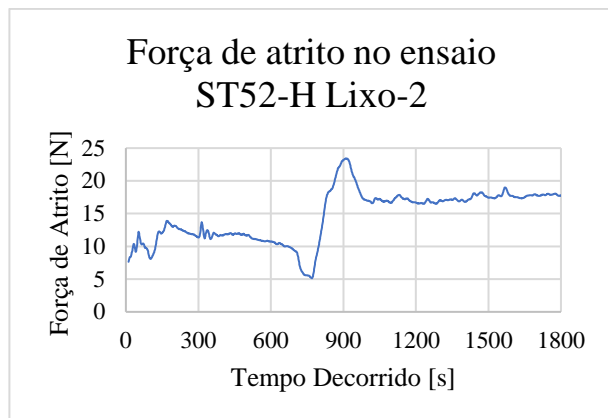
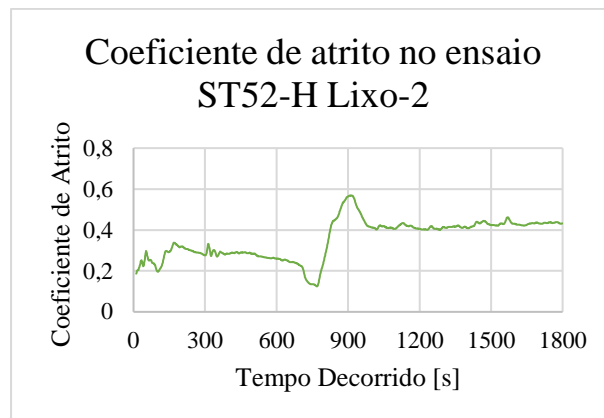


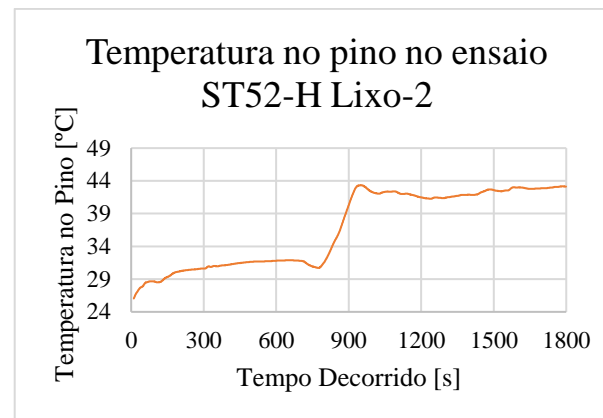
Figura E.8 – Resultados do ensaio R304-D Lixo-1: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



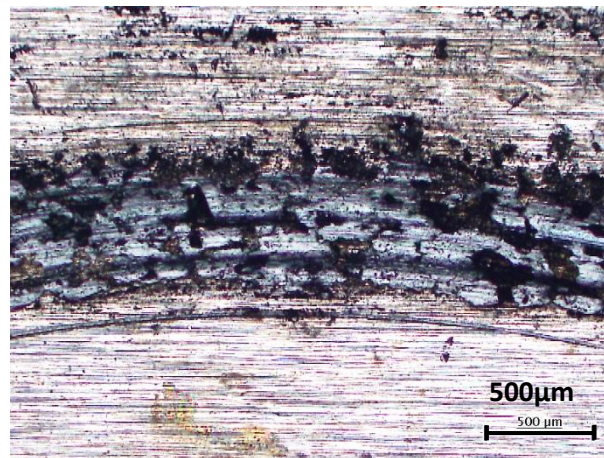
(b)



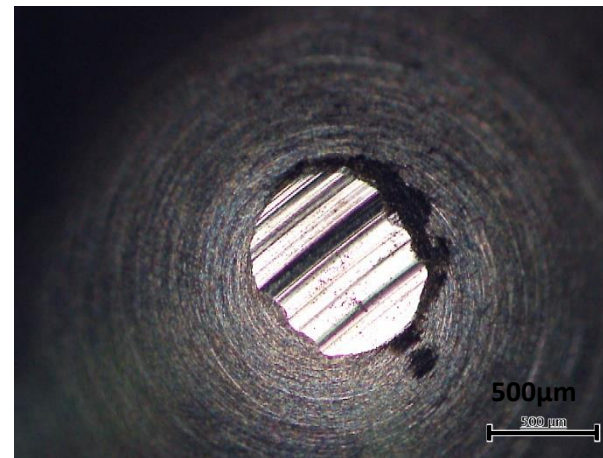
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.9 – Resultados do ensaio ST52-H Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



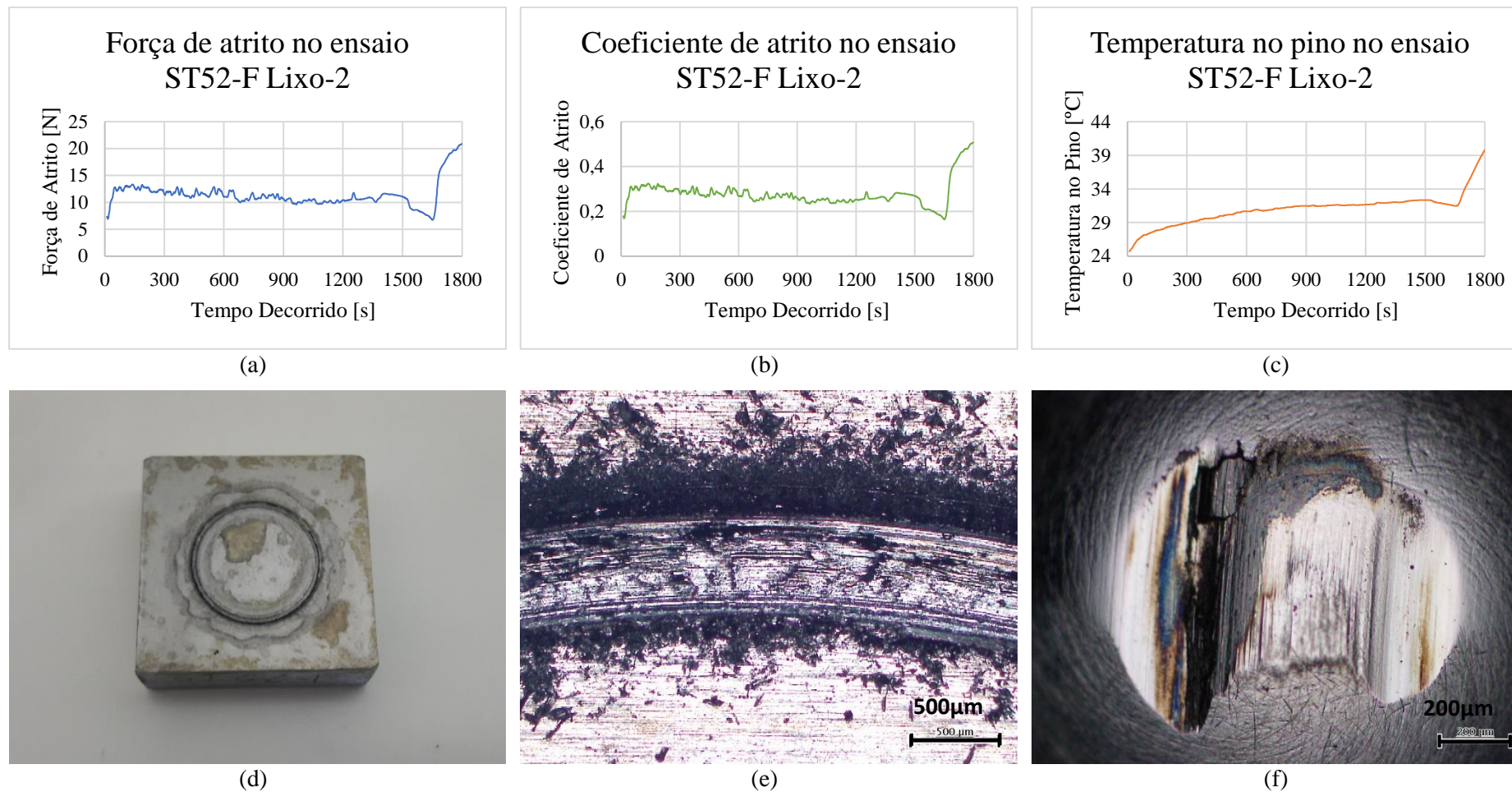
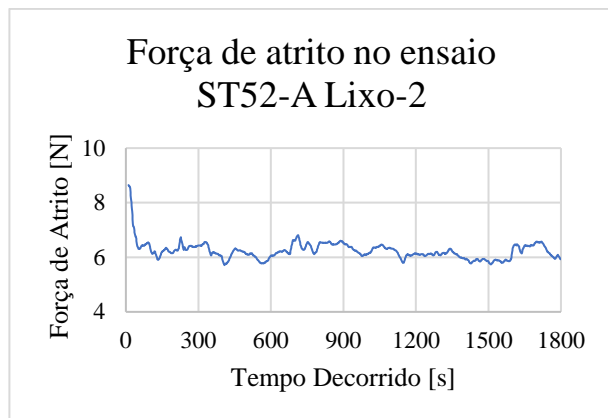
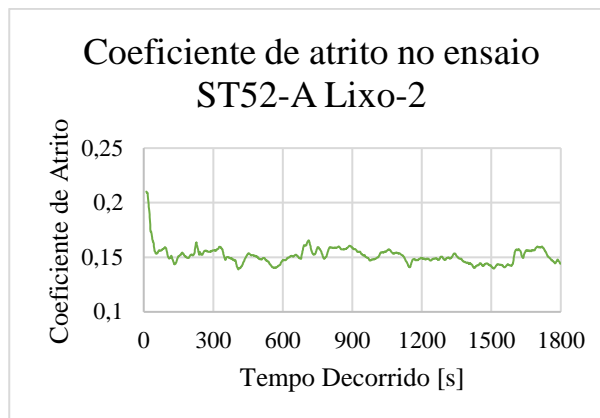


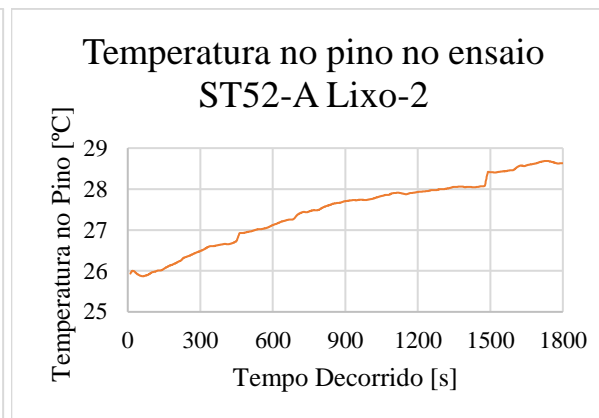
Figura E.10 – Resultados do ensaio ST52-F Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



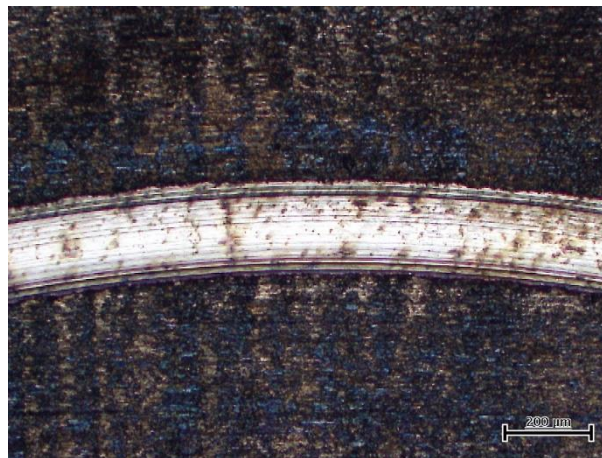
(b)



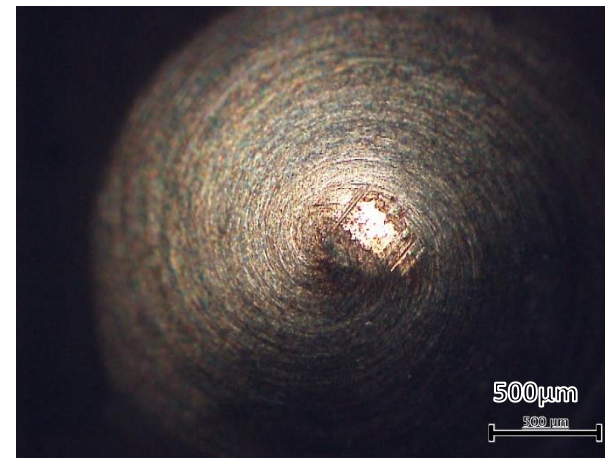
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.11 – Resultados do ensaio ST52-A Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

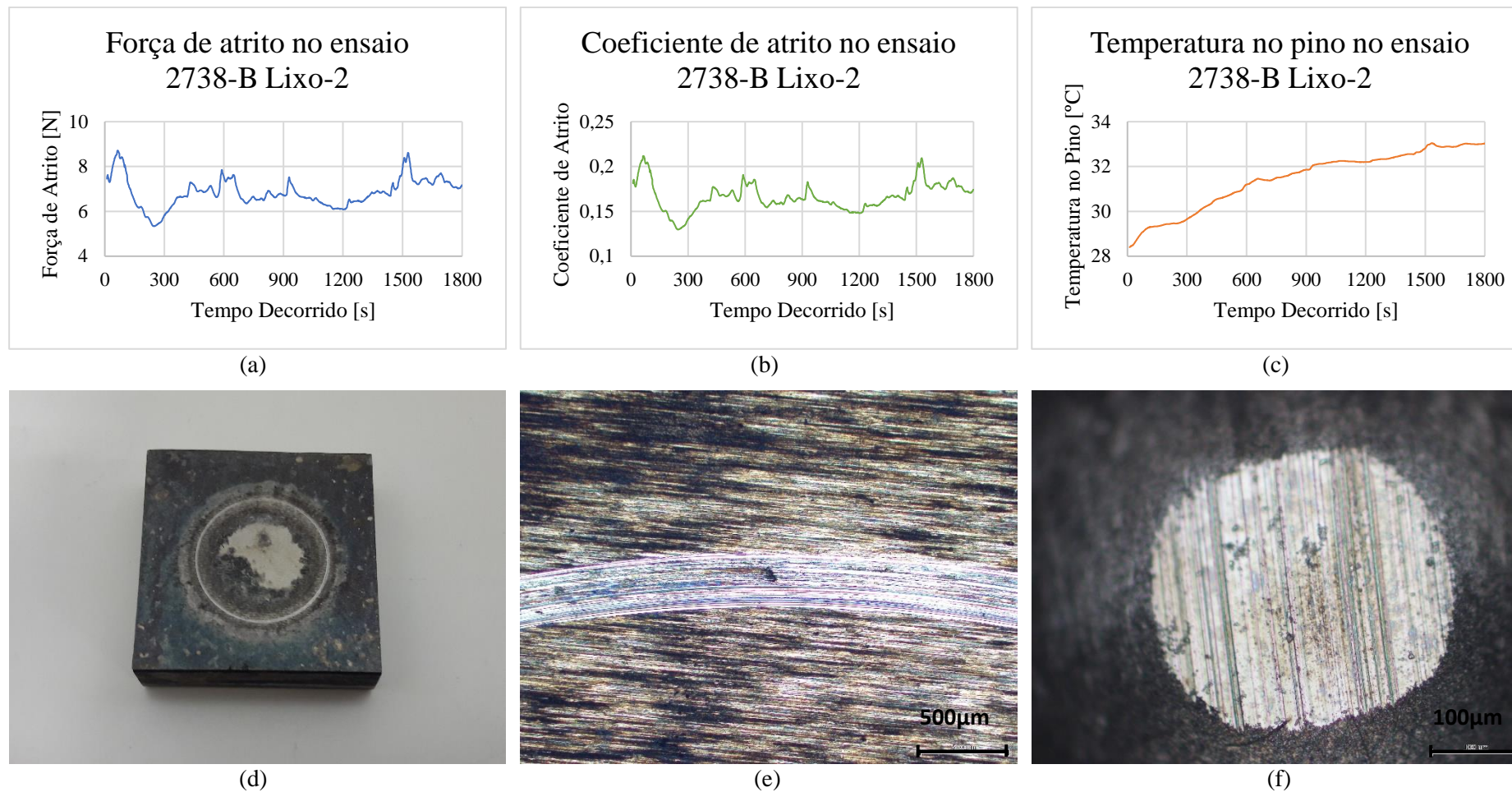


Figura E.12 – Resultados do ensaio 2738-B Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



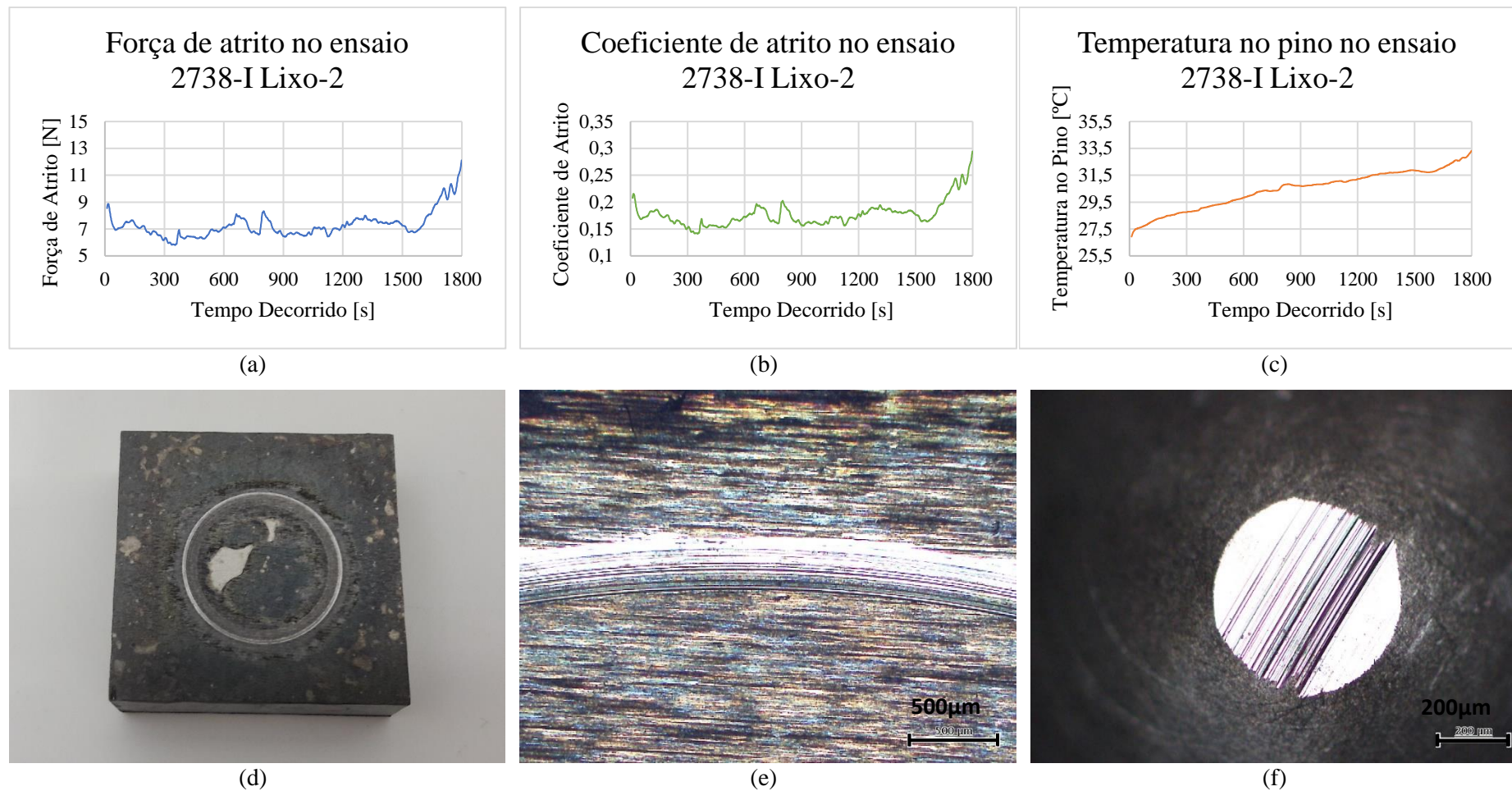


Figura E.13 – Resultados do ensaio 2738-I Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

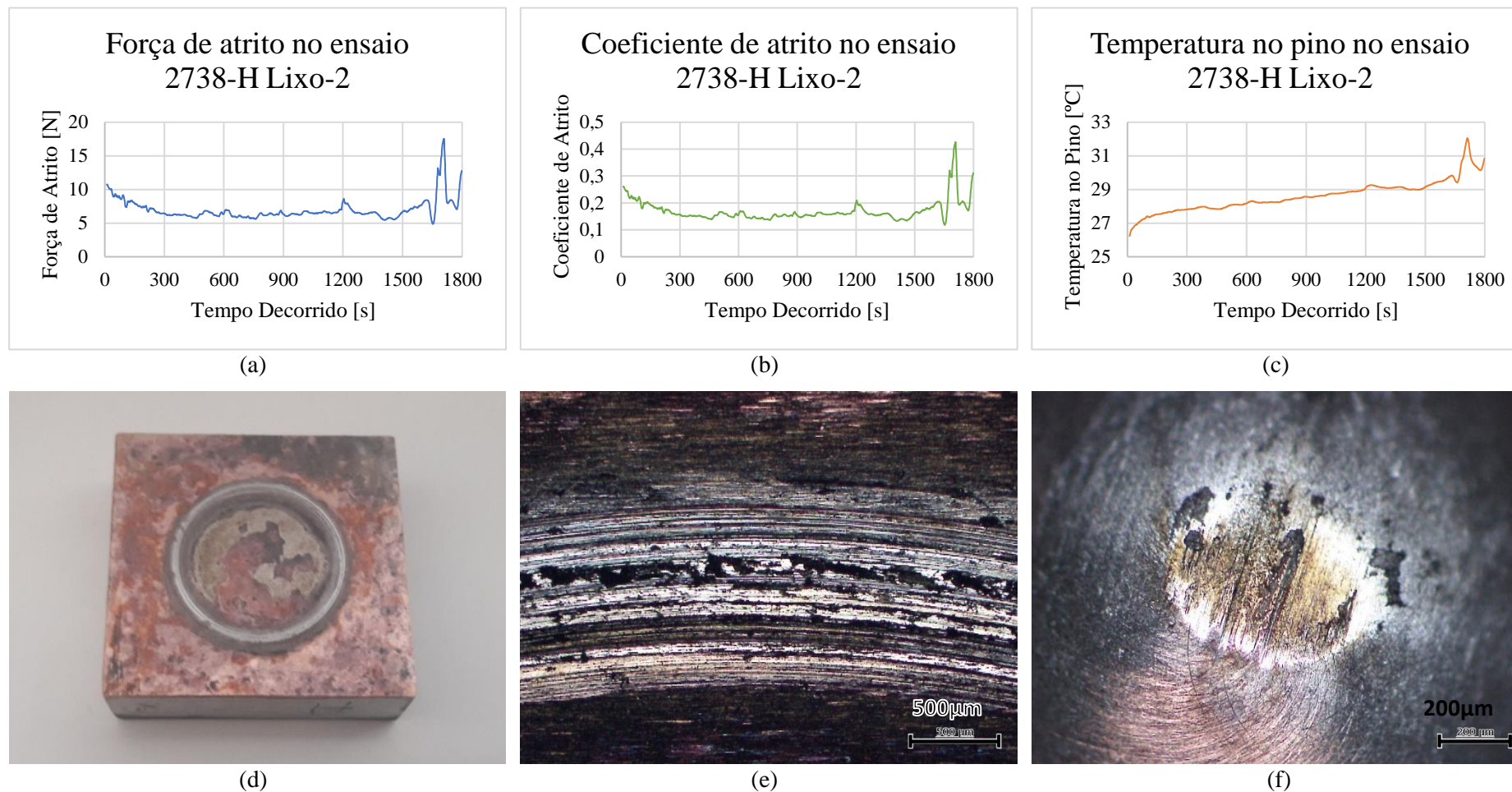
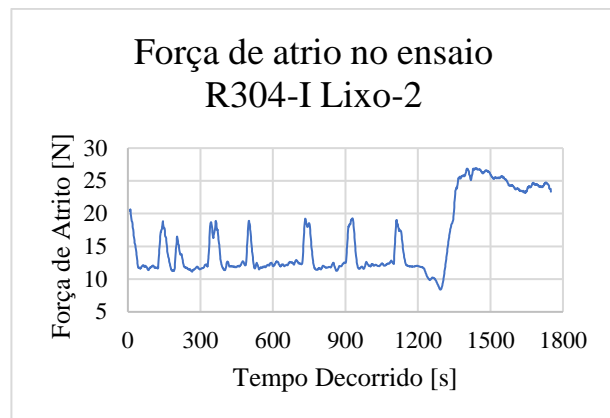
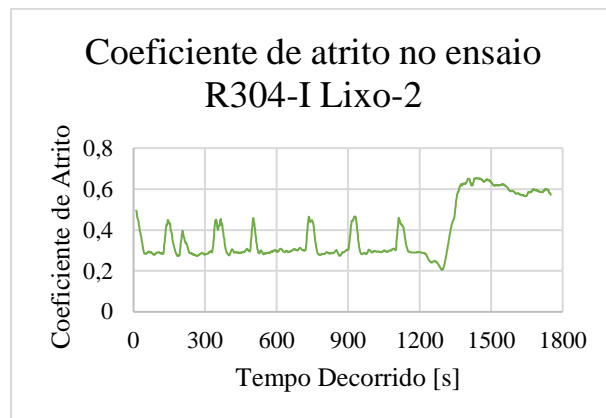


Figura E.14 – Resultados do ensaio 2738-H Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

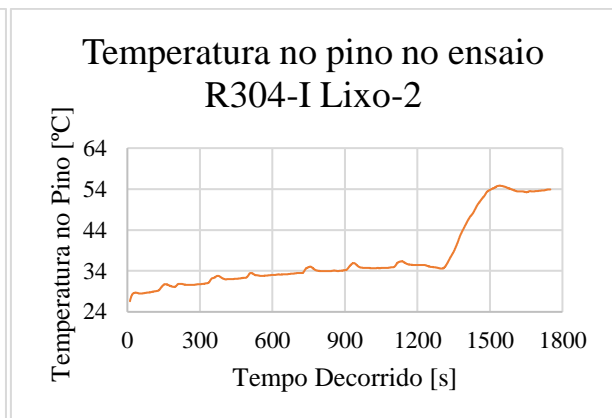




(a)



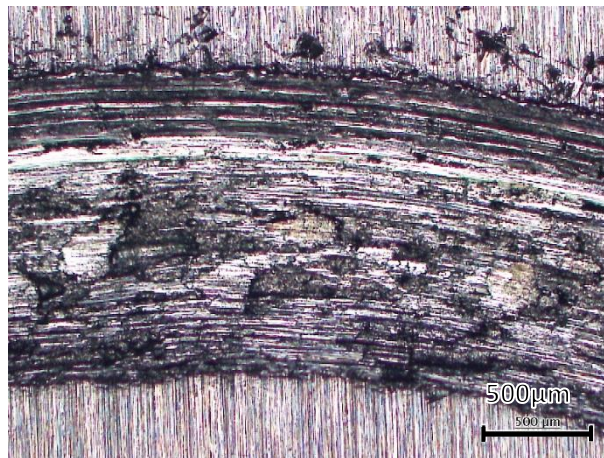
(b)



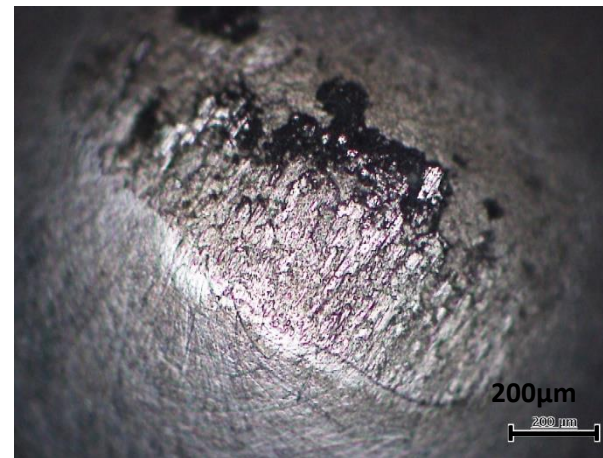
(c)



(d)

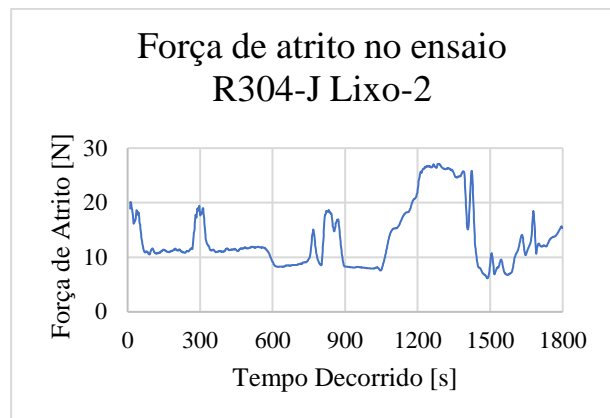


(e)

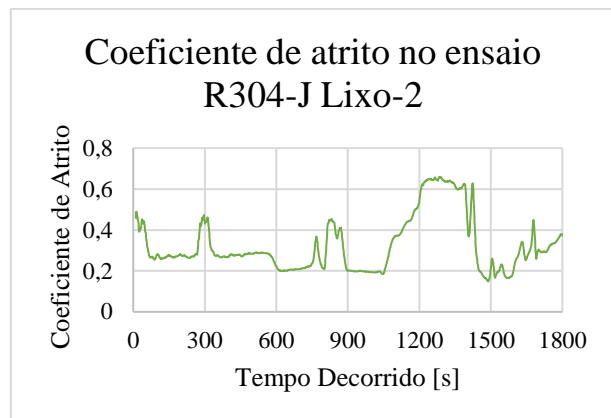


(f)

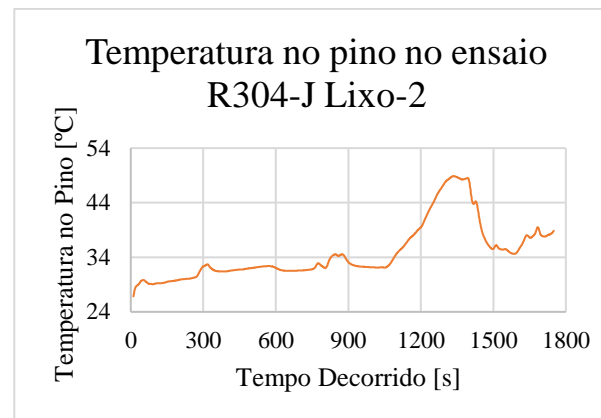
Figura E.15 – Resultados do ensaio R304-I Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



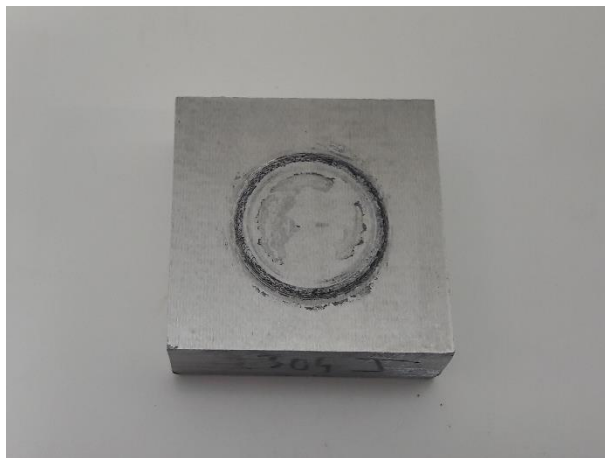
(a)



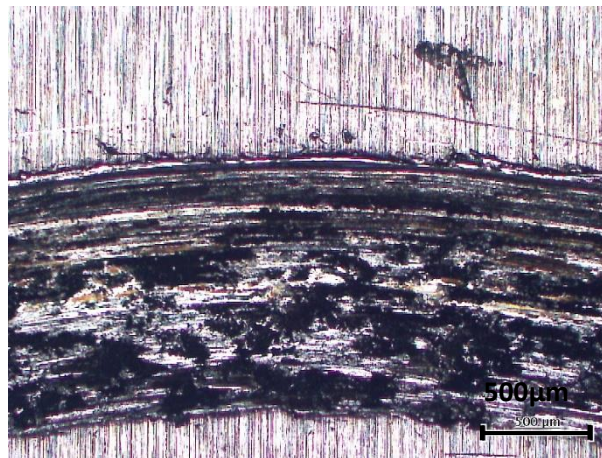
(b)



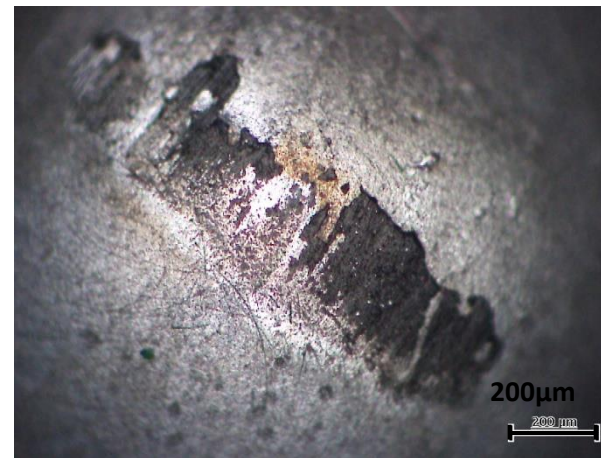
(c)



(d)

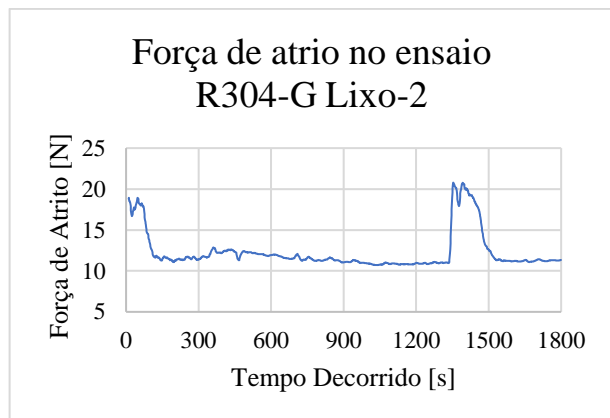


(e)

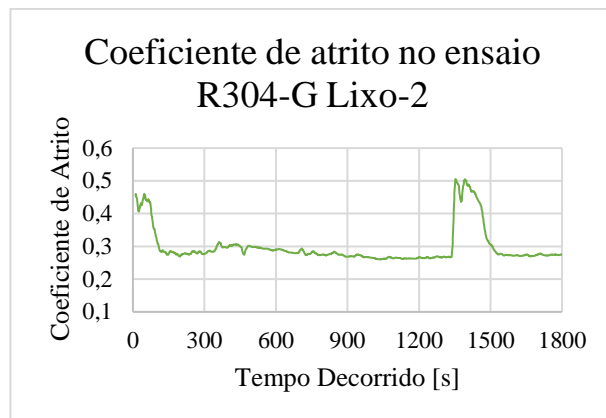


(f)

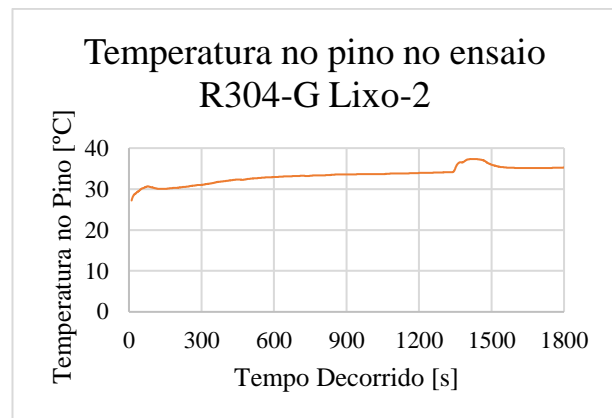
Figura E.16 – Resultados do ensaio R304-J Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



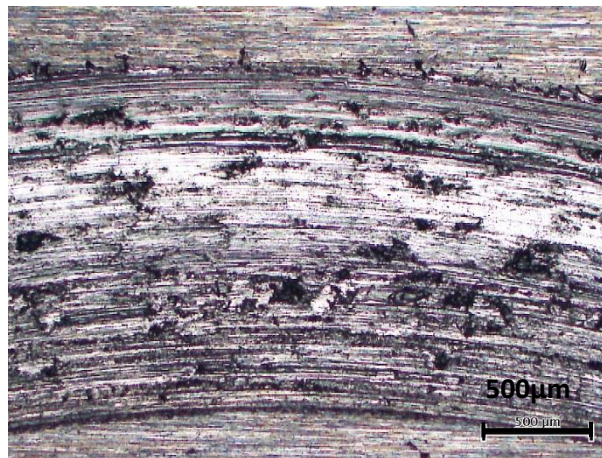
(b)



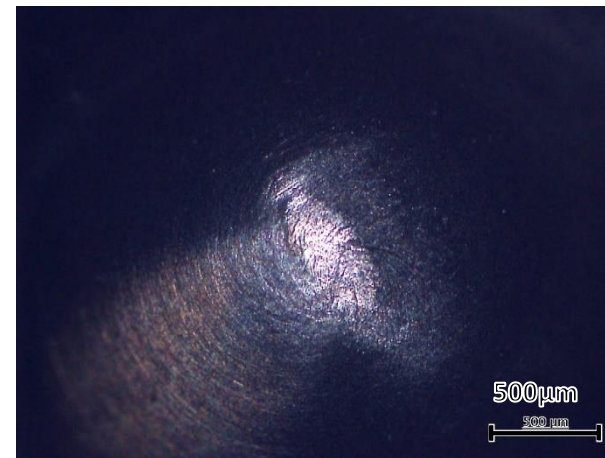
(c)



(d)



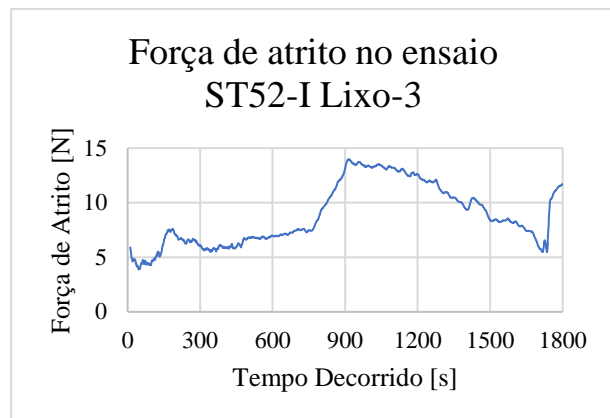
(e)



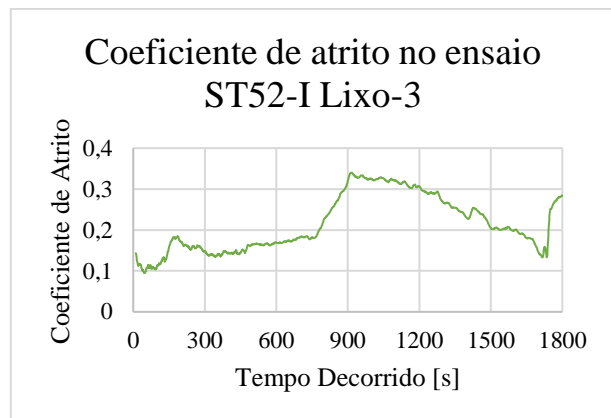
(f)

Figura E.17 – Resultados do ensaio R304-G Lixo-2: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

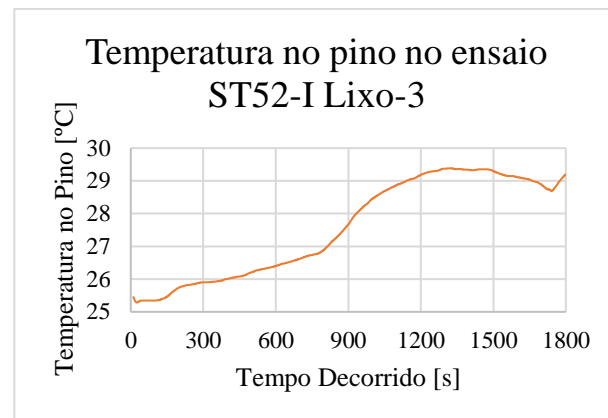




(a)



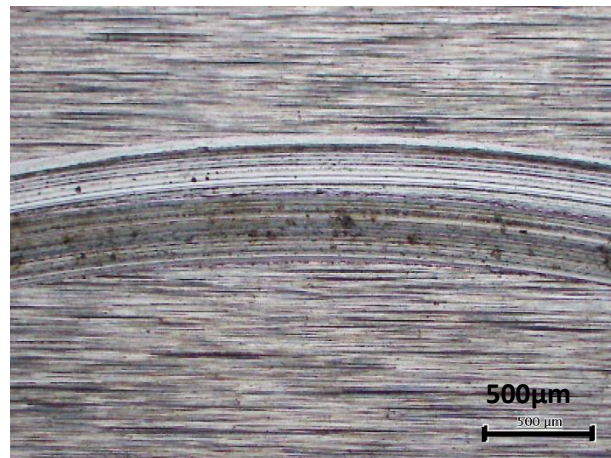
(b)



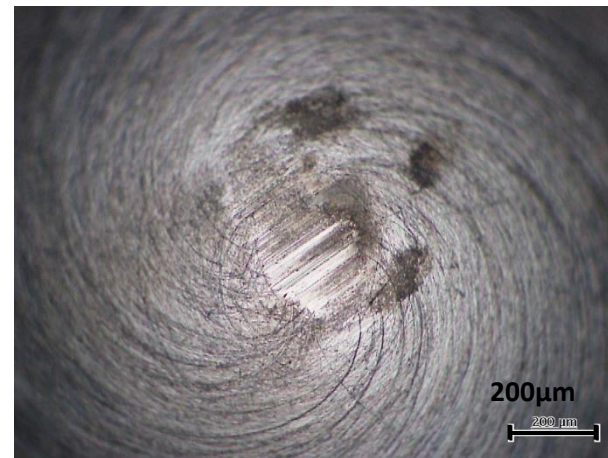
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.18 – Resultados do ensaio ST52-I Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

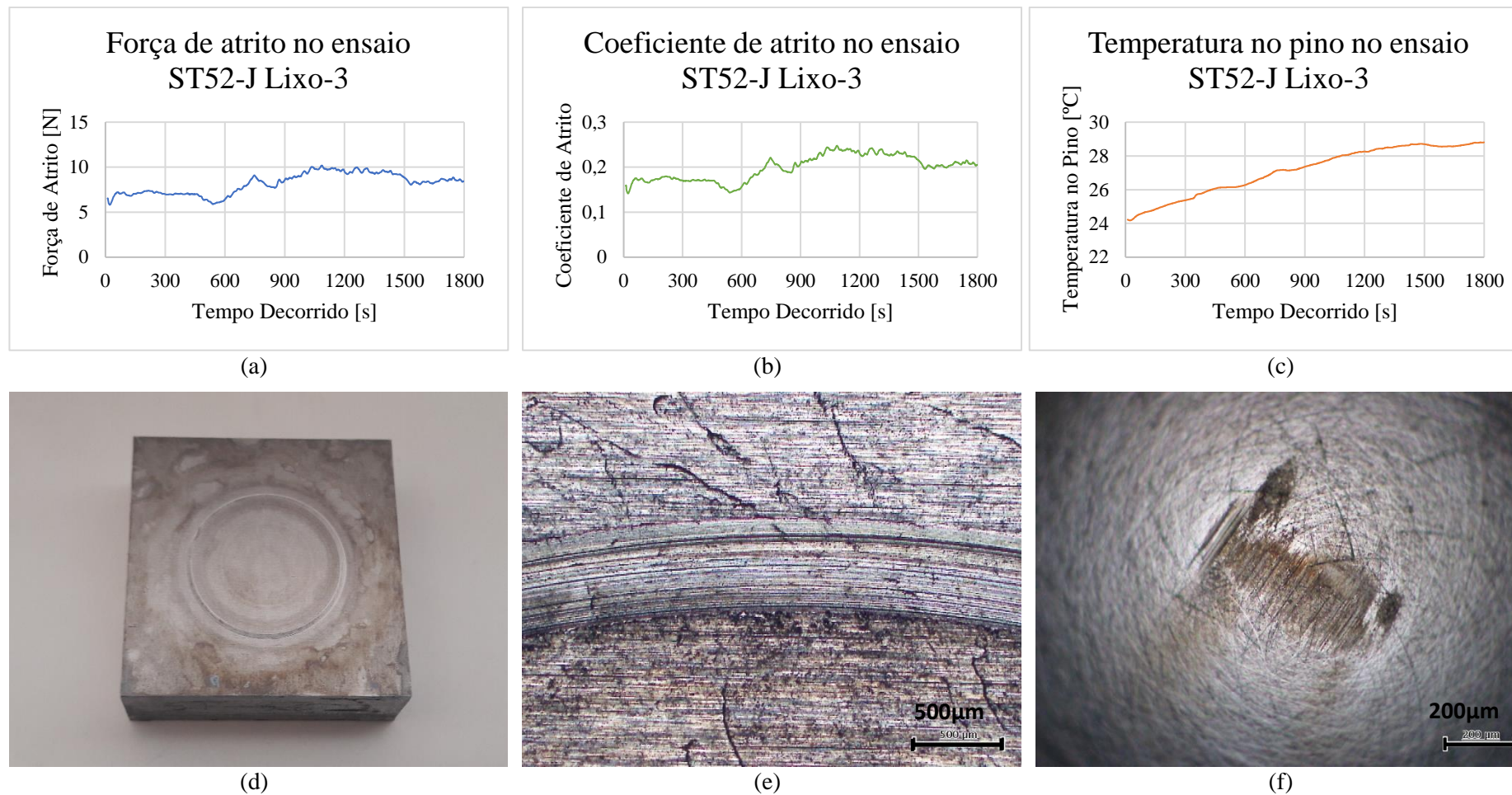
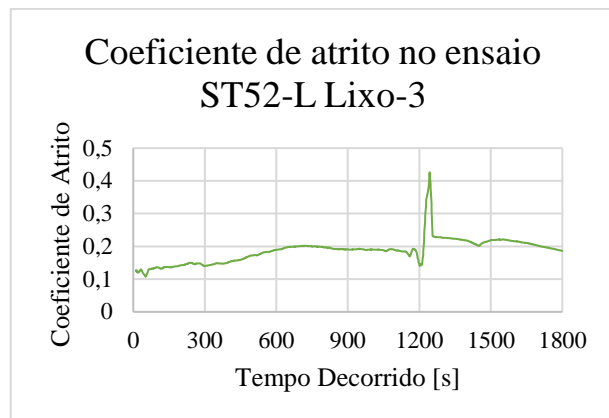


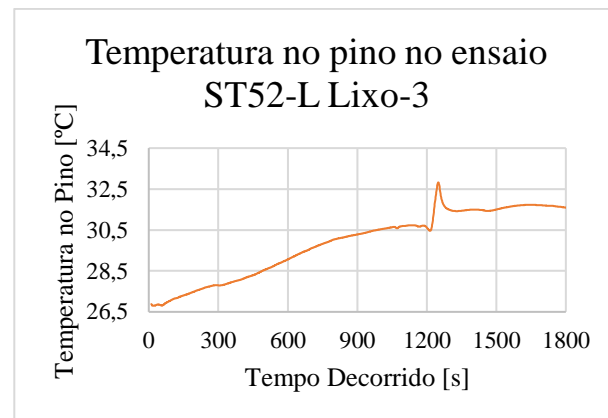
Figura E.19 – Resultados do ensaio ST52-J Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



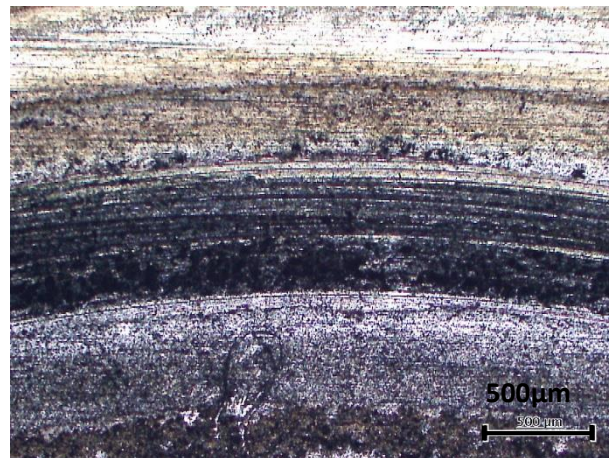
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.20 – Resultados do ensaio ST52-L Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



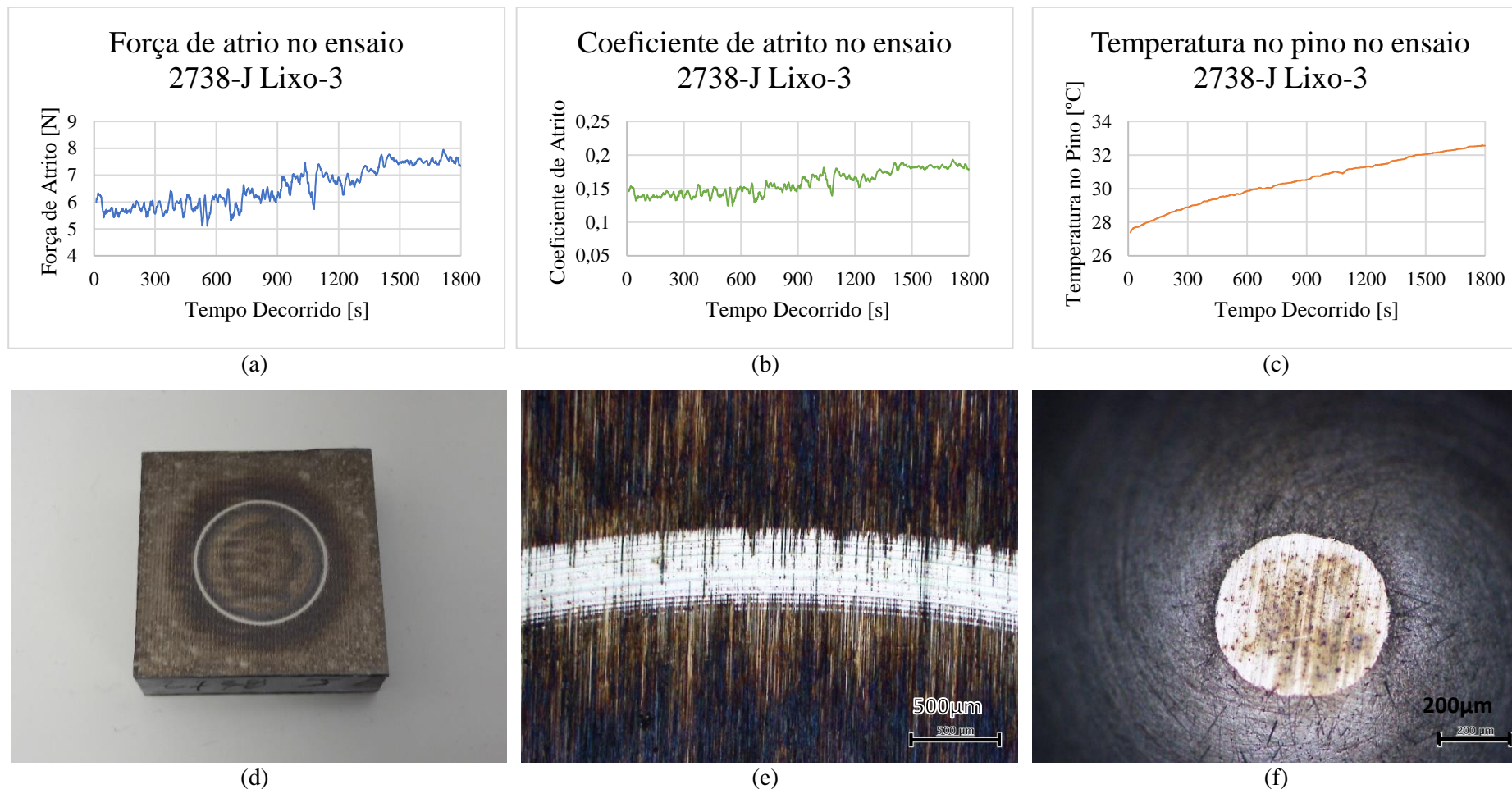
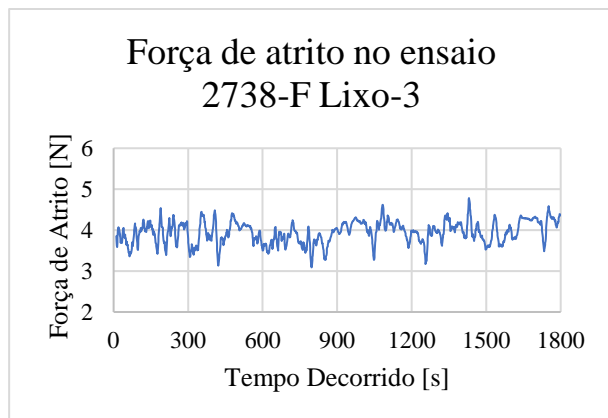
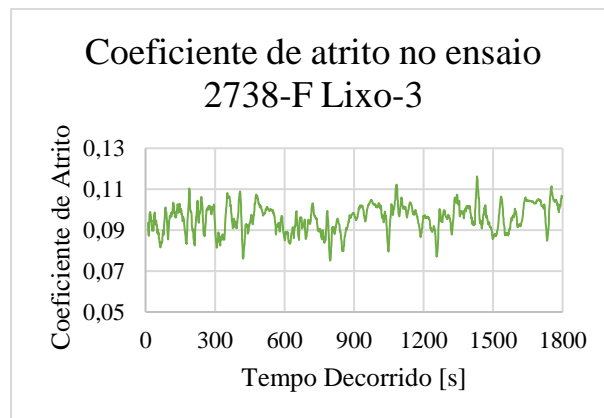


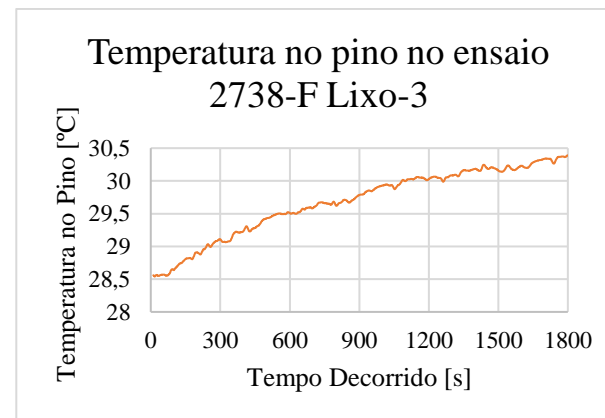
Figura E.21 – Resultados do ensaio 2738-J Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.



(a)



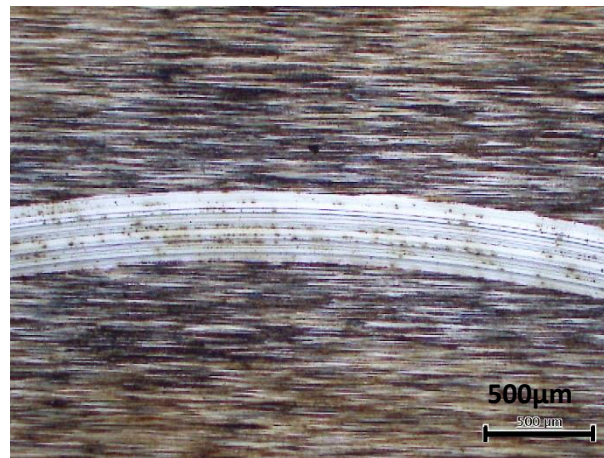
(b)



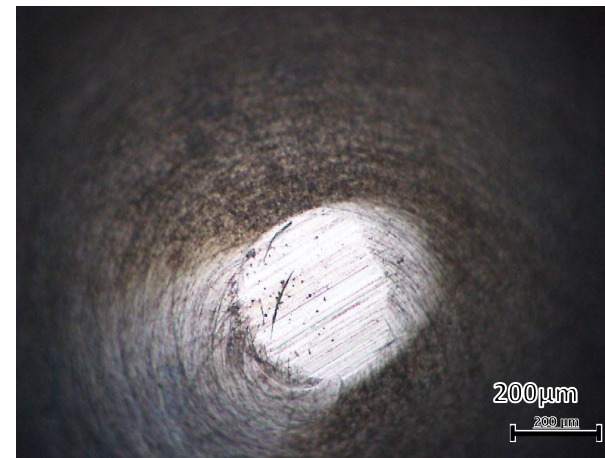
(c)



(d)



(e)



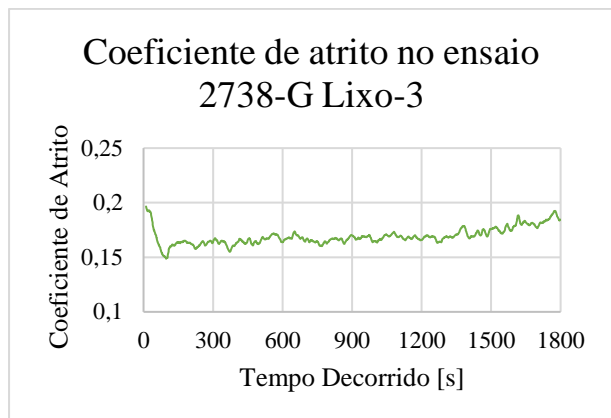
(f)

Figura E.22 – Resultados do ensaio 2738-F Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

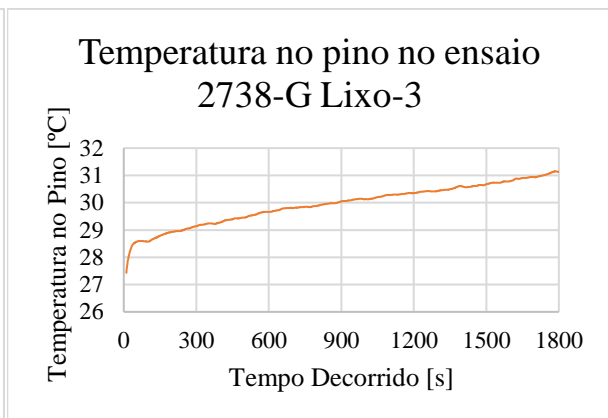




(a)



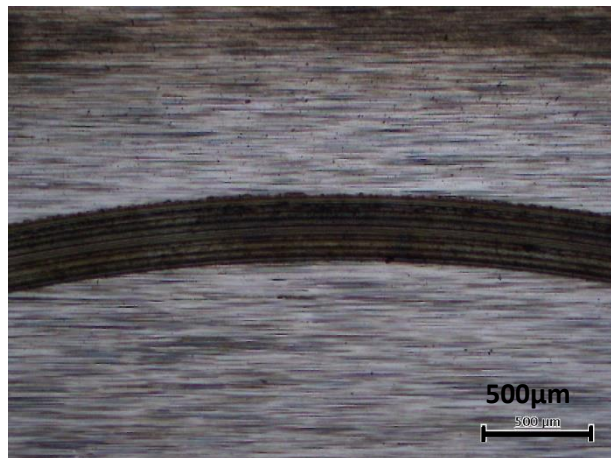
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.23 – Resultados do ensaio 2738-G Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

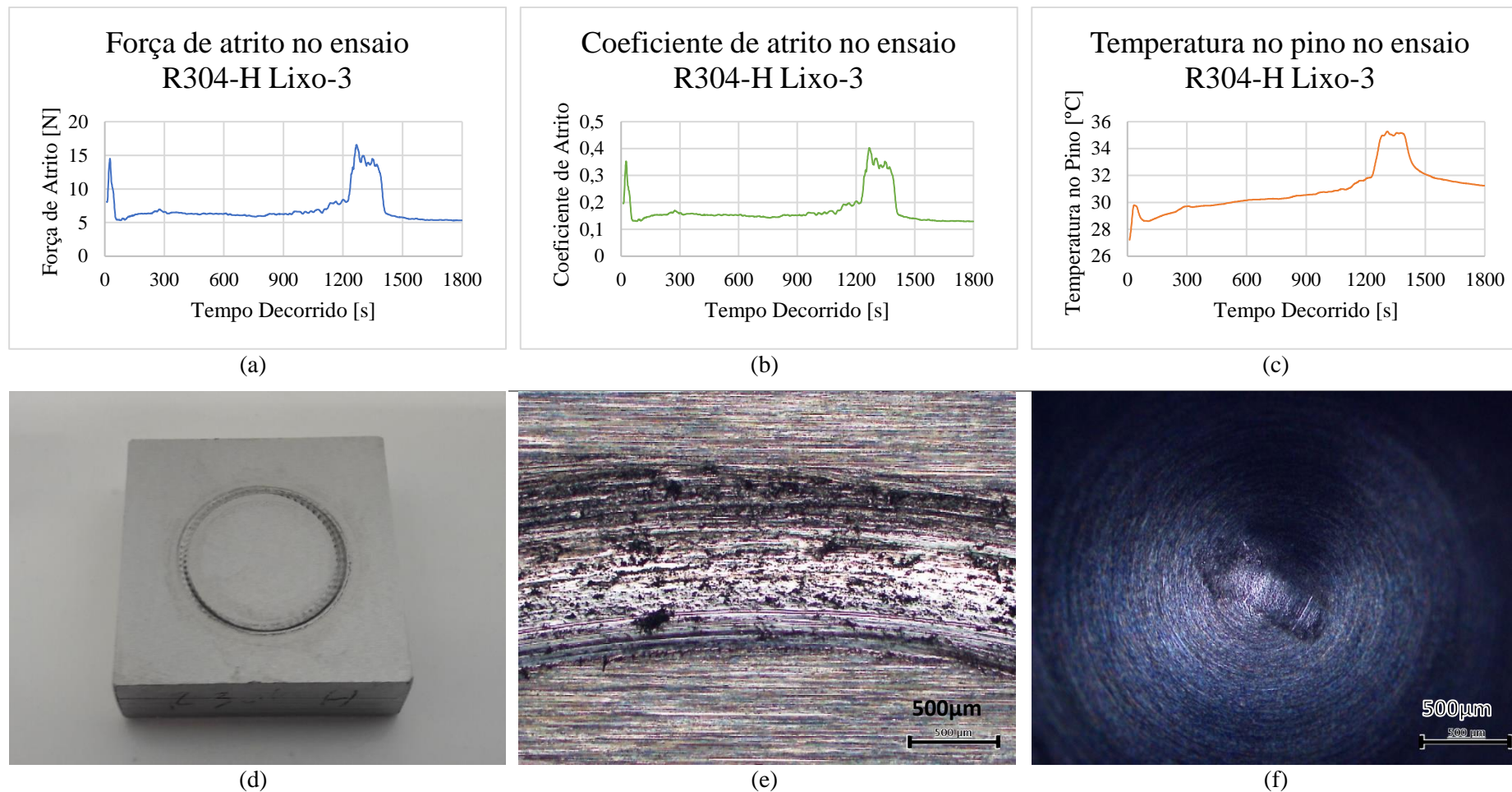


Figura E.24 – Resultados do ensaio R304-H Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

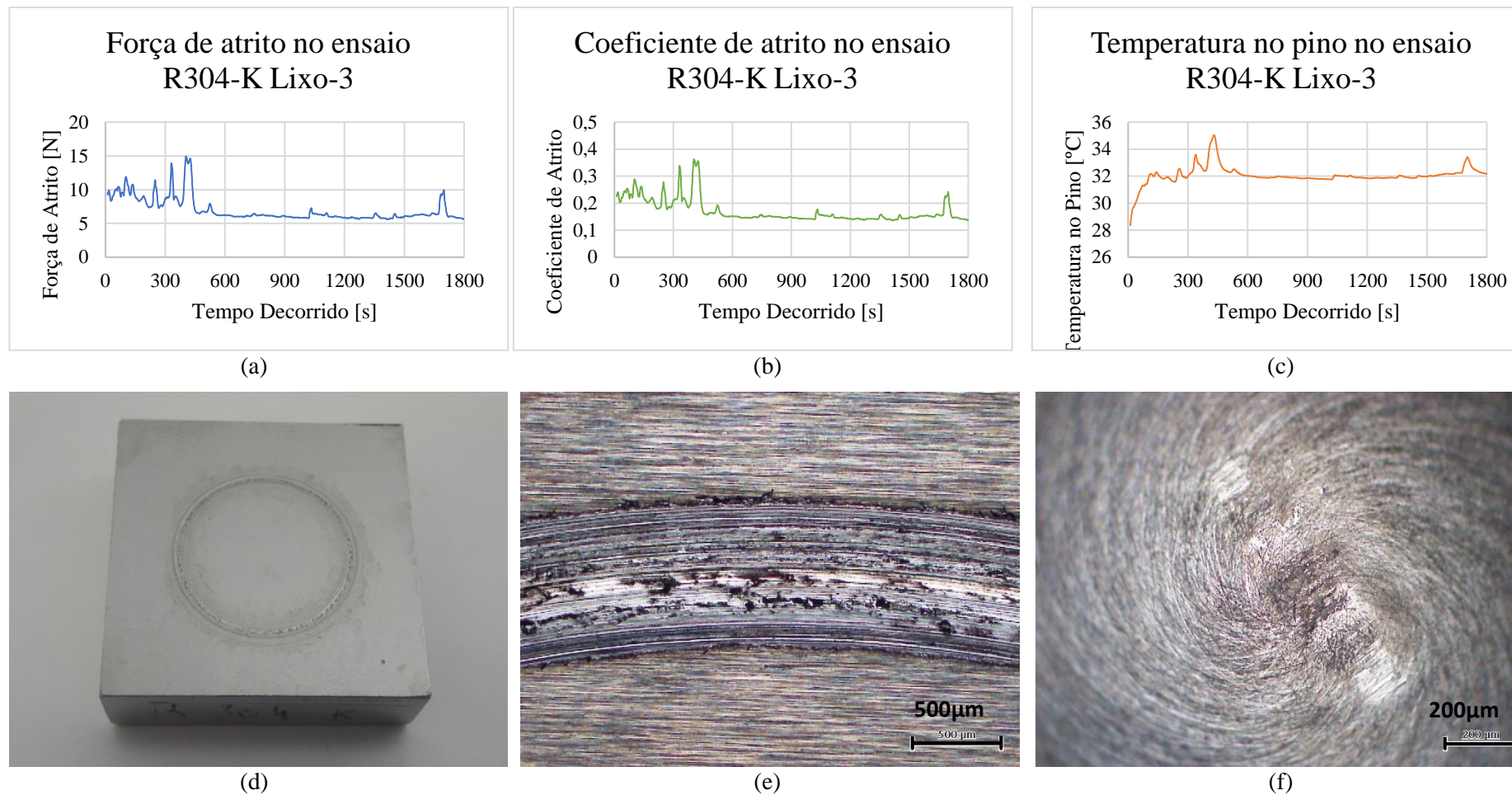
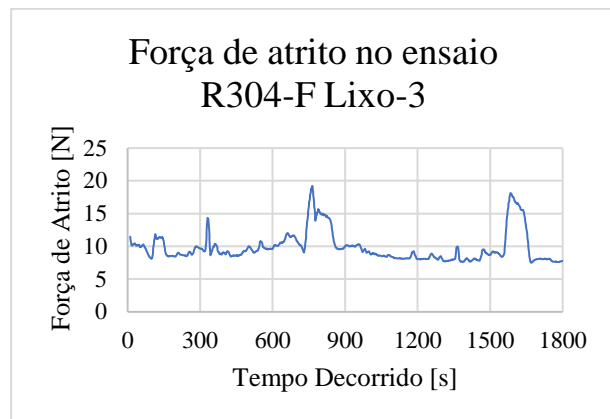
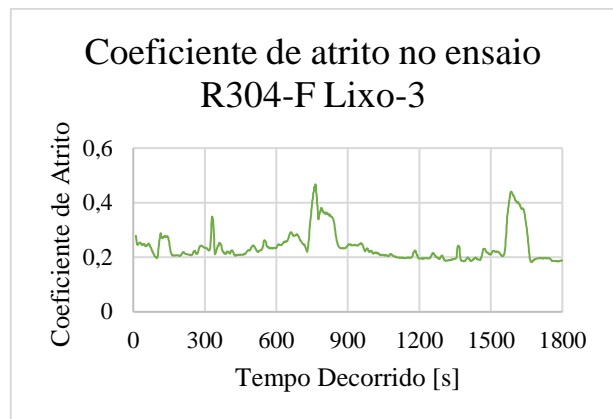


Figura E.25 – Resultados do ensaio R304-K Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.

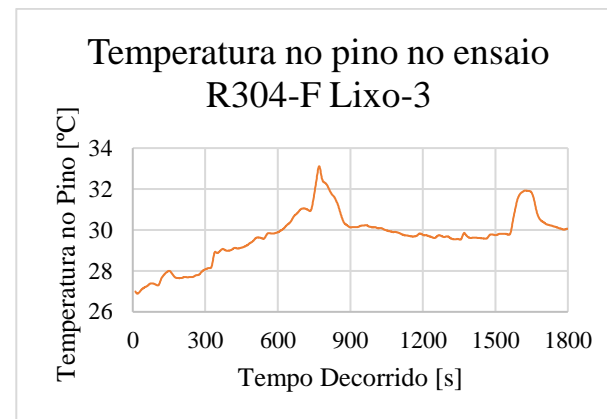




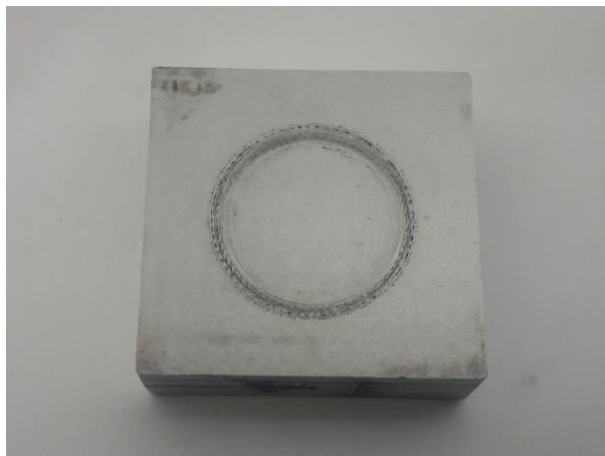
(a)



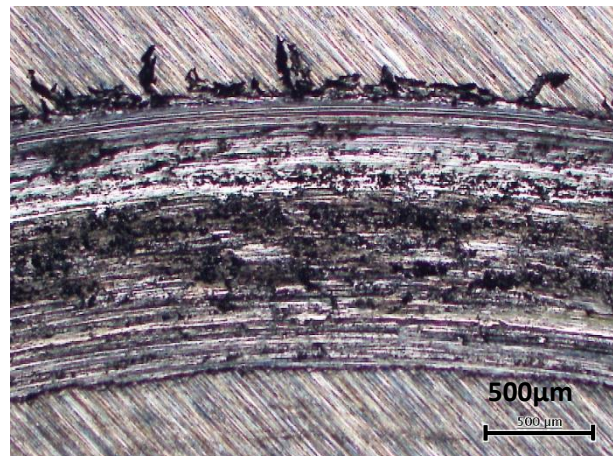
(b)



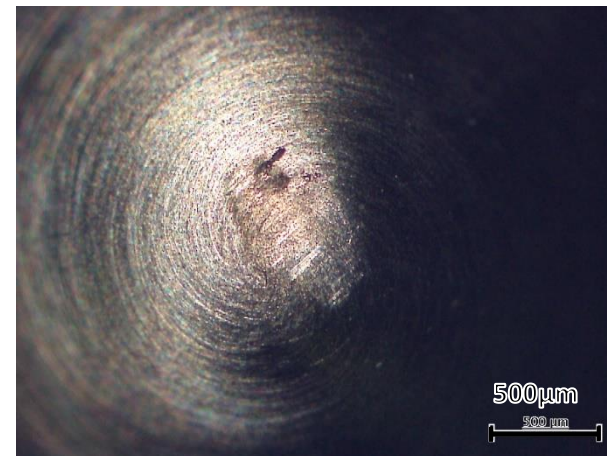
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura E.26 – Resultados do ensaio R304-F Lixo-3: (a) gráfico da força de atrito em função do tempo; (b) gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo; (c) gráfico da temperatura no pino em função do tempo; (d) fotografia da superfície da amostra; (e) pormenor da pista de desgaste e (f) pormenor do pino.